

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

OTIMIZAÇÃO DO MODELO DE MÚLTIPLAS FONTES PONTUAIS PONDERADAS
UTILIZANDO O ALGORÍTMO DE OTIMIZAÇÃO EXTREMA GENERALIZADA (GEO) PARA
CHAMAS COM ESCOAMENTO DE VENTO CRUZADO

por

Mateus Beltrami

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

Porto Alegre, Dezembro de 2017

OTIMIZAÇÃO DO MODELO DE MÚLTIPLAS FONTES PONTUAIS PONDERADAS
UTILIZANDO O ALGORÍTMO DE OTIMIZAÇÃO EXTREMA GENERALIZADA (GEO) PARA
CHAMAS COM ESCOAMENTO DE VENTO CRUZADO

por

Mateus Beltrami

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof.^a Dra. Eng.^a Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

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

Orientador: Prof. Dr. Eng. Felipe Roman Centeno

Comissão de Avaliação:

Prof.^a Dra. Thamy Cristina Hayashi

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin

M.Sc. José Leandro Rosales Luz

Porto Alegre, 08 de Dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Jair e Deize, por todo o suporte e incentivo ao longo da graduação, bem como minha irmã, Júlia que sempre me apoiou em meus estudos.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Felipe Roman Centeno, pela orientação na reta final da graduação, desenvolvendo o tema estudado e auxiliando na elaboração do trabalho.

Agradeço ao Eng. Me. Luís Quezada, por todo o auxílio e instruções ao longo do trabalho.

Agradeço aos colegas e amigos do Laboratório de Combustão, sempre solícitos às dificuldades.

BELTRAMI, M. **Otimização do Modelo de Múltiplas Fontes Pontuais Ponderadas Utilizando o Algoritmo de Otimização Extrema Generalizada (GEO) para Chamas com Escoamento de Vento Cruzado**. 2017. 25. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

O presente trabalho estuda a aplicação e otimização de modelos simplificados de engenharia para prever o fluxo radiativo proveniente de chamas difusivas turbulentas sob o efeito de um escoamento de ar lateral. Para o estudo, é empregado uma base de dados experimentais, que considera chamas de gás natural com diversas potências e diluições de CO₂. Foi implementado o modelo de única fonte pontual e múltiplas fontes ponderadas. Foi estabelecido um processo de otimização sobre o modelo de múltiplas fontes pontuais como um problema inverso. O método estocástico, *Generalized Extremal Optimization*, foi empregado para encontrar a melhor combinação das variáveis do problema. O resultado final gerou um polinômio de segundo grau para a definição dos fatores de ponderação para o conjunto das chamas estudadas.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização, múltiplas fontes ponderadas, vento lateral, única fonte pontual

BELTRAMI, M. **Optimization Of the Weighted Multiple Points Source Model Utilizing the General Extremal Optimization (GEO) for Flames in an air Cross Flow.** 2017. 25. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

The present study implements engineering simplified methods to predict the radiant heat flux emitted by diffusive turbulent flames under the influence of an air crossflow. In this study, an experimental database is used which considers natural gas flames with various flame powers and CO₂ dilution. The single point source model and weighted multiple point source model were implemented. An optimization process was established using the multiple point source as an inverse problem. The stochastic model, Generalized Extremal Optimization, was used to search the best combination of the problem variables. The final results created a second degree polynomial to distribute the weighted factors to the group of flames studied.

KEYWORDS: Optimization, weighted multiple point source, crossflow, single point source

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	2
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
	3.1 Radiação Térmica.....	2
	3.2 Fluxo de Calor Radiativo e Fração Radiativa.....	2
	3.3 Influência da Diluição com CO ₂	3
	3.4 Modelo de Fonte Pontual, SPS.....	3
	3.5 Modelo de Múltiplas Fontes Ponderadas, WMPS.....	4
	3.6 Otimização Extrema Generalizada, GEO.....	5
4	METODOLOGIA	6
5	RESULTADOS.....	8
6	CONCLUSÕES.....	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
	Apêndice I	16
	Apêndice II.....	17
	Apêndice III.....	18

1. INTRODUÇÃO

A utilização da combustão para a transformação da energia encontra-se em uma grande área de processos de fabricação e geração de energia em geral. De acordo com Enerdata, 2017, 21% de toda a energia consumida mundialmente é da queima de gás natural, enquanto 91% é de energia gerada por meio de combustão. Há uma preocupação crescente com o impacto ambiental gerado pelo não cumprimento das normas ambientais implementadas, as ineficiências térmicas nas indústrias ou má utilização dessas fontes de energia. Dessa maneira, torna-se missão de institutos de pesquisa, universidades e empresas envolvidas no setor a pesquisa e o desenvolvimento de maneiras mais eficientes e sustentáveis de utilização desses recursos.

A radiação emitida em decorrência do processo de combustão é de grande interesse para estudos devido à sua grande influência na transferência de calor. Dentre as diversas aplicações, encontram-se as chamas difusivas, que não se misturam com o oxidante antes da combustão, acontecendo a difusão somente na frente de chama. Essas chamas são caracterizadas pela fuligem, indicada por sua cor amarelada. Esse tipo de chama gera interesse devido às suas aplicações, como em motores diesel, fornos e *flares* para descarte de rejeitos. Focando-se nos *flares*, que podem oferecer riscos devido à sua instalação próxima a pessoas e outros equipamentos, há o interesse no estudo do fluxo de calor radiativo proveniente de tais chamas.

Parte desse ponto o presente trabalho, com objetivo de aplicar um método que auxilie no estudo da radiação emitida por chamas difusivas com diluição de CO₂ submetidas a ventos laterais. Esses pontos são importantes, pois os mesmos são encontrados em situações reais de *flares* utilizados em refinarias, já que o vento é uma variável comum em situações de campo e, também, devido à composição do gás associado ao petróleo conter concentração de CO₂.

Costa, 2016, estudou modelos para a estimativa de fluxo de calor radiativo proveniente de chamas turbulentas difusivas. Em seu trabalho os modelos de única fonte pontual, múltiplas fontes ponderadas e um terceiro modelo proposto por Modak, 1977 são comparadas. O terceiro modelo apresentou melhor concordância com os dados experimentais, porém os outros 2 foram satisfatórios para elevadas vazões.

Hankinson e Lowesmith, 2012, exploraram as condições de proximidade da chama. Foi encontrado que o método de múltiplas fontes pontuais foi capaz de replicar os resultados experimentais tanto para regiões próximas quanto para regiões afastadas das chamas, enquanto o uso de formas geométricas como cilindros, cones e troncos de cones para a representação da chama precisam de fatores de ajuste mesmo em medições afastadas da chama. Por fim, foi proposta uma forma idealizada com pontos distribuídos em sua superfície que apresentaram resultados satisfatórios para ambas as regiões.

Zhou e Jiang, 2016 propuseram um novo modelo semi-empírico para determinação do fluxo de calor radiativo. O modelo considera que toda a energia térmica é emitida ao longo de uma linha localizada dentro do volume da chama. Os resultados encontrados por esse método foram capazes de prever o fluxo de calor radiativo para chamas pequenas e grandes, encontrando resultados melhores do que o de múltiplas fontes ponderadas e única fonte pontual.

Quezada, 2017, estudou a geometria, estabilidade e emissão de radiação térmica de chamas difusivas com diluição de CO₂. Foi encontrado no trabalho que o ponto de emissão máximo proposto por Hankinson e Lowesmith, 2012, de 0,75 comprimentos de chama não apresentou os melhores resultados, mas sim na posição de 0,60. Além disso, as distribuições dos pesos mostraram-se independentes do bocal do queimador e da potência da chama. Comparando-se com chamas de mesma vazão, a adição de CO₂ reduziu a fração radiativa e também diminuiu o volume de chama.

2.OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar os modelos de engenharia de única fonte pontual (SPS) e das múltiplas fontes ponderadas (WMPS) fazendo-se uma comparação com uma base de dados experimentais. Especificamente, os objetivos são:

- Implementar os modelos WMPS e SPS padrão para estimar o fluxo de calor radiativo de chamas turbulentas com escoamento lateral;
- Implementar o modelo WMPS no algoritmo de otimização GEO para determinar as variáveis desejadas com uma aproximação mais próxima dos dados experimentais;
- Analisar diversas abordagens para simplificar o problema e determinar um modelo global para estimar o fluxo radiativo para as diversas chamas estudadas.

3.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Radiação Térmica

A radiação térmica caracteriza-se por não precisar de um meio para sua propagação. A transferência de energia é realizada através de um espectro eletromagnético. Em chamas, a maior parte da transferência de calor encontra-se no espectro visível e infravermelho, Incropera et al, 2008.

De acordo com Turns, 2000, as chamas são compostas por uma mistura de gases e partículas (fuligem) que constituem um meio participante da radiação térmica. Estes interagem entre si por meio de absorção, emissão e espalhamento em função da concentração, pressão e temperatura do meio. A radiação térmica é emitida em espectros diferentes de acordo com os produtos de combustão H_2O , CO_2 , CO e CH_4 . Enquanto que a fuligem gerada pela combustão parcial dos hidrocarbonetos, responsável pela cor alaranjada das chamas difusivas, é responsável pela maior parte da radiação emitida pela chama, segundo Faeth *et al.*, 1989.

3.2 Fluxo de Calor Radiativo e Fração Radiativa

A fração de energia radiativa emitida por uma chama, X_R , representa a parcela de energia liberada por radiação em relação à potência da chama. Coelho e Costa, 2007, definem essa propriedade como a razão entre a quantidade de calor liberada por radiação por unidade de tempo, Q_R [W] e a potência total da chama, Q_F [W]. Essa definição resulta na Equação 3.1.

$$X_R = \frac{Q_R}{Q_F} \quad (3.1)$$

O método mais simples para calcular a energia total emitida por radiação, é assumir a chama como uma única fonte de emissão, localizada em seu epicentro. Dessa forma, é possível assumir que as intensidades provenientes da chama possuem uma distribuição isotrópica (iguais em todas as direções). Esta hipótese permite estabelecer uma superfície de integração esférica no entorno da chama. Para essa condição, $Q_R = A_{esf} \cdot q''_{exp}$, onde A_{esf} é a área da esfera em torno do ponto e q''_{exp} é o fluxo de energia liberado por radiação experimental [W/m²]. Essa definição leva a equação 3.2, que pode ser usada para determinação da fração radiante.

$$X_R = \frac{4\pi q''_R R_f^2}{Q_F \tau_S \cos\varphi} \quad (3.2)$$

Onde R_f é a distância do epicentro da chama até o ponto de medição. A emissão total da chama pode ser determinada por $Q_F = \dot{m}H$, onde \dot{m} é a vazão mássica de combustível [kg/s] e H é o poder calorífico do combustível [kJ/kg]. A transmitância da atmosfera também

entra nesta equação como τ_s . Hankinson e Lowesmith, 2012 demonstrou que para distâncias de medição menores de 3 m, a transmissividade pode ser aproximada de 1, sem causar impacto relevante nos resultados.

Oliveira, 2017, encontrou uma correlação para o cálculo da fração radiante verificando o comportamento da mesma em seus dados experimentais, que serão utilizados nesse trabalho. A mesma é função da velocidade do vento lateral U_∞ [m/s], da vazão total V [l/min] e da razão mássica saindo do queimador C_f , que é uma propriedade adimensional definida como a razão entre a massa de combustível e a massa total. A Equação 3.3 demonstra essa correlação.

$$X_R = 0,0618 \ln \left(\frac{U_\infty}{C_f V^{1/4}} \right) + 0,2049 \quad (3.3)$$

3.3 Influência da Diluição com CO₂

A presença de CO₂ na diluição de combustíveis acarreta em diversas influências no comportamento da chama. Nonaka e Pereira, 2016, utilizaram o método de fluxo de calor para determinar a influência da diluição na variação da velocidade de chama laminar, parâmetro definido, de acordo com Coelho e Costa, 2007, como a velocidade, em relação à frente de chama, à qual os reagentes se deslocam, na direção perpendicular à frente de chama.

Machado, 2015, estudou os efeitos da diluição com CO₂ sobre a geometria e fluxo de calor radiante em chamas laminares. Foi demonstrado no estudo que, para chamas com mesma vazão de combustível, houve um pequeno aumento do comprimento visível de chama e um decréscimo no fluxo de calor radiante.

Quezada, 2017, em seu estudo encontrou que a presença de CO₂ resultou em diminuição da fração radiativa e diminuição de volume da chama, comparando-se chamas com mesma vazão total.

3.4 Modelo de Fonte Pontual, SPS

O modelo de única fonte pontual, a partir daqui referenciado apenas como SPS, aproxima a radiação emitida por uma chama como um ponto. Conhecendo a fração radiante da chama e rearranjando a equação 3.2 pode-se estimar o fluxo radiativo emitido pela mesma através da equação 3.4.

$$q''_{SPS} = \frac{X_R Q_F \tau_s}{4\pi R_f^2} \cos\varphi \quad (3.4)$$

As variáveis envolvidas já foram descritas anteriormente, com exceção do ângulo φ . Esse ângulo tem o papel de contabilizar o fato de o sensor não ter sua superfície de medição completamente perpendicular à linha que liga o ponto central da chama e a posição do sensor, como pode ser observado na figura 3.1.

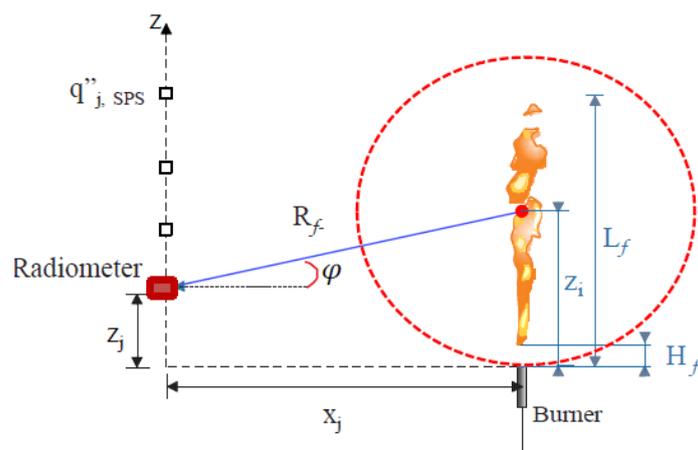


Figura 3.1 – Representação da medição pelo método SPS. *Burner* representa o queimador e *radiometer* é o radiômetro usado para medições Fonte: Quezada, 2017.

Os parâmetros geométricos representados na figura são o comprimento de chama L_f , a altura de levantamento H_f , a distância do bocal do queimador até o centro do comprimento de chama, Z_i e a altura do sensor Z_j . Para facilidade e melhor resolução das medições, posiciona-se o sensor de maneira que $Z_j = 0,5L_f$, para que o mesmo fique na mesma altura em relação ao centro da chama. É importante observar, que para a utilização de maneira satisfatória desse método, deve-se obedecer uma distância x_j de aproximadamente 2 comprimentos de chama L_f , Markstein, 1984.

3.5 Modelo de Múltiplas Fontes Ponderadas, WMPS

O Modelo de Múltiplas Fontes Ponderadas, a partir daqui chamado apenas de WMPS, é uma abordagem proposta por Hankinson e Lowesmith, 2012, no qual divide-se a chama em N fontes equidistantes ao longo do eixo da mesma. A partir daí definem-se fatores de ponderação para cada ponto, de maneira que partes da chama onde há maiores emissões contribuam de maneira mais relevante para o resultado final do somatório do fluxo radiante. A figura 3.2 mostra a chama dividida de acordo com o modelo WMPS.

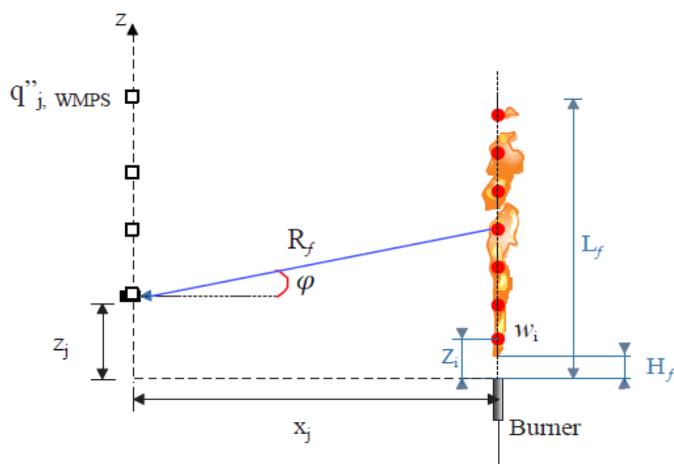


Figura 3.2 – Representação da medição no método WMPS. Fonte: Quezada, 2017

O equacionamento geral segue de maneira parecida ao do SPS, porém agora é preciso fazer um somatório das intensidades provenientes das fontes que estão emitindo radiação, como representado na equação 3.5.

$$q''_{WMPS} = \sum_{i=1}^N \frac{w_i X_R Q_F \tau_S}{4\pi R_f^2} \cos\varphi \quad (3.5)$$

Ou seja, para cada ponto de medição será feito um somatório de todas as fontes na chama, multiplicada por um fator de ponderação w_i . A definição dos pesos feita por Hankinson e Lowesmith, 2012, é linear, tendo seu pico em $n = 0,75N$ e decaindo a partir desse ponto, também de maneira linear. Além disso, há a restrição do somatório de todos os fatores de ponderação ser igual a 1, contabilizando com o somatório, então, 100% do valor de fluxo radiativo. As equações 3.6, 3.7, e 3.8 são utilizadas para a distribuição dos pesos.

$$w_j = jw_1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{para } 0 < n \leq 0,75N \quad (3.6)$$

$$w_j = \frac{\left[n - \frac{n-1}{N-(n+1)}(j-(n+1)) \right] w_1}{\sum_{j=1}^n w_j}, \quad j = n+1, n+2, \dots, N \quad \text{para } n > 0,75N \quad (3.7)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (3.8)$$

3.6 Otimização Extrema Generalizada, GEO

De acordo com Miguel, 2015, problemas inversos, que buscam minimizar a diferença entre as soluções inversas e experimentais, podem ser classificados em 2 grupos. Um deles trabalha as equações matemáticas para a obtenção de resultados explícitos e o outro resolve o problema através da utilização de uma função objetivo.

Originalmente proposto por Sousa et al., 2003, o método de otimização extrema generalizada, daqui para frente referenciado como GEO, tem como uma de suas vantagens a possibilidade de adaptação para diferentes problemas de otimização, independente da área a ser estudada. Miguel, 2015 utilizou o algoritmo para um problema similar ao aqui proposto. Foi utilizado na determinação de fatores de ponderação para o modelo WMPS com o objetivo de aproximar melhor o modelo de valores experimentais de chamas laminares sem vento lateral. Da mesma maneira, Quezada, 2017, programou o algoritmo com o mesmo objetivo, porém em chamas de potências mais elevadas, também sem vento lateral.

O ponto inicial é determinar qual vai ser a função objetivo F_o a ser calculada. Essa função é particular de cada problema a ser resolvido e irá guiar o programa para determinar a convergência da solução até que um critério de parada seja atingido.

O método funciona transformando cada variável real do problema em um sistema binário de m números de *bits*. Todas as variáveis a serem otimizadas são dispostas em um único vetor. Com essas informações, passa-se a modificar sequencialmente cada *bit* da e categorizá-lo, com base na melhora ou piora da função objetivo, como mais ou menos propensão a modificações. A figura 3.3 mostra um vetor com V_n variáveis que foram divididas em 6 *bits* cada.

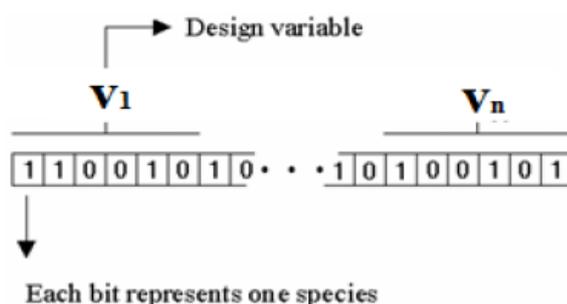


Figura 3.3 – Variáveis distribuídas em uma sequência binária. Fonte: Adaptado de Sousa, 2003.

4. METODOLOGIA

As medições realizadas por Oliveira, 2017, são utilizadas para avaliar os modelos de engenharia. Os dados foram obtidos conforme figura 4.1. Os dados foram obtidos para 45 condições diferentes de chama, variando-se a vazão total de combustível saindo de um queimador de 7,55 milímetros de diâmetro interno, a velocidade do vento lateral e a diluição com CO_2 . O gás combustível utilizado foi o gás natural veicular comercial GNV com composição química estimada de 90,8% CH_4 , 6% C_2H_6 , 1,2% C_3H_8 , 0,5% CO_2 e 1,55% N_2 , GasNet, 2017. A pureza do dióxido de carbono foi de 99,2%. Os parâmetros escolhidos para o experimento foram de 20, 25, 30, 35 e 40 L/min para a vazão na saída do queimador. As diluições com CO_2 foram de 0, 10 e 20% e as velocidade de vento cruzado foram de 0,5, 1 e 1,5 m/s. A origem do sistema de coordenadas definido está na saída do queimador. O eixo Y é a altura das medições com sentido positivo para cima, o eixo X é a posição dos sensores ao longo de um plano paralelo de medições com sentido positivo na direção do vento e o eixo Z determina a distância do queimador ao plano de medição.

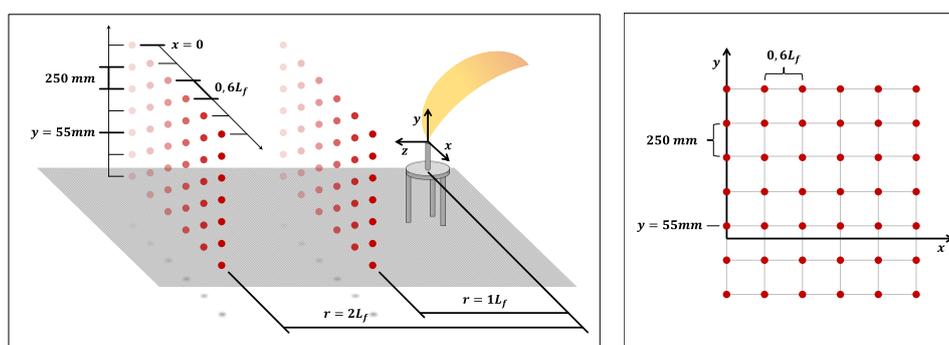


Figura 4.1 – Esquema representativo do posicionamento dos sensores durante a obtenção dos fluxos de calor radiante. – Adaptado de Oliveira, 2017.

As medições foram feitas em 7 posições fixas representadas na figura 4.1. Paralelamente ao plano da chama, os sensores foram movidos para posições em função dos comprimentos de chama respectivos partindo do 0 e variando-se com passos de 0,6 comprimentos de chama chegando a um máximo de 3. Todas essas medições foram repetidas para 2 planos com distâncias entre as chamas e os sensores de 1 e 2 comprimentos de chama. Para o presente trabalho, escolheu-se estudar o primeiro plano de medições que é de maior interesse por ser mais perto da chama e, portanto, mais difícil de prever seu comportamento.

Para quantificar os desvios entre os modelos e os dados experimentais, foram propostas as equações 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5.

$$\gamma_f = \frac{\sum_{j=1}^{J=42} |q''_{j,f,exp} - q''_{j,f,mod}|}{J} \quad (4.1)$$

$$\gamma_{f-norm} = \left[\frac{\sum_{j=1}^{J=42} |q''_{j,f,exp} - q''_{j,f,mod}|}{J} \right] \frac{1}{q''_{f,exp,max}} \quad (4.2)$$

$$\gamma_{f-loc} = \max |q''_{f,exp} - q''_{f,mod}| \quad (4.3)$$

$$\gamma = \frac{\sum_{f=1}^{f=F} \gamma_f}{F} \quad (4.4)$$

$$\gamma_{norm} = \frac{\sum_{f=1}^{f=F} \gamma_{f-norm}}{F} \quad (4.5)$$

Emprega-se a equação 4.1 para o cálculo do desvio absoluto médio γ_f , em função do valor pontual experimental $q''_{j,f,exp}$ e do valor obtido pelo modelo $q''_{j,f,mod}$. Obtém-se o módulo dessa equação e o somatório dividido pelos 42 pontos medidos é o resultado desejado. A equação 4.2 funciona de maneira parecida, porém divide-se a equação 4.1 pelo valor experimental máximo, $q''_{f,exp,max}$, para encontrar um valor normalizado, γ_{f-norm} em função da grandeza de radiação da chama medida.

A equação 4.3 calcula a máxima diferença entre o valor experimental e o valor estimado, γ_{f-loc} . Enquanto as equações 4.4 e 4.5 são utilizadas para conjuntos de chamadas, ou seja, tira-se a média de todas as chamadas, encontrando valores médios, γ , dos desvios absolutos individuais e também valores médios normalizados, γ_{norm} , para valores médios normalizados individuais.

Os métodos WMPS e SPS foram implementados e foram feitas comparações para o número de fatores de ponderação do modelo de múltiplas fontes ponderadas. Para o caso de uma reta inclinada (referente ao caso com vento cruzado), não há uma definição de qual a melhor maneira de se distribuir os pesos. Por esse motivo, foram feitas duas abordagens diferentes. Em uma delas considera-se a geometria de chama como a definição feita por Oliveira, 2017, representada na figura 4.2.a. A outra abordagem está na figura 4.2.b, que distribui os pesos ao longo de uma reta que parte do bocal do queimador.

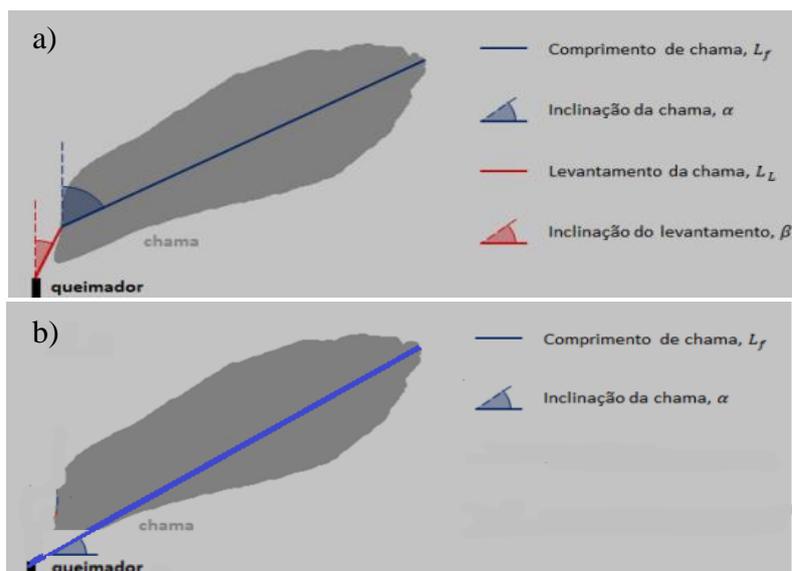


Figura 4.2 – a) Definição e reta feita por Oliveira, 2017. b) Definição da reta saindo do queimador.- Adaptado de Oliveira, 2017

Após essa análise, foi feito um estudo para determinar, para as chamas estudadas, qual seria o ponto ideal para definir-se o ponto máximo. Afinal, não necessariamente a distribuição proposta por Hankinson e Lowersmith, 2012 é a melhor. Portanto, foram feitos testes variando de $n=0,50N$ até $n=0,85N$ para encontrar o valor que melhor aproxima-se dos dados experimentais.

Finalmente, foi implementado o algoritmo GEO. O mesmo foi adaptado de Miguel, 2015, para a geometria das chamas com vento cruzado. Primeiramente foram realizados testes para parâmetros livres de radiação, que posteriormente foram definidos em uma curva polinomial de segundo grau e generalizados para 45 chamas.

Todos os casos estudados pelo GEO foram feitos para 500.000 iterações, iniciando-se em 20 pontos diferentes para encontrar o melhor τ para cada caso. Após definido, são feitas 2.000.000 iterações iniciando em 20 pontos diferentes. Foi verificada que a convergência dos resultados de maneira geral estão dentro de 0,5%.

5. RESULTADOS

Os resultados encontrados serão comparados com as medições experimentais obtidas por Oliveira, 2017, conforme mencionado na metodologia. Na tabela 5.1 há uma comparação do número de pesos do modelo WMPS e o modelo SPS para uma chama de potência igual a 17,07 kW, com vazão de 30 L/min, vento lateral de 0,5 m/s sem diluição de CO_2 a uma distância de 1 comprimento de chama L_f . Na primeira coluna estão os valores de desvio absoluto médio normalizado, γ_{f-norm} , desvio absoluto médio, γ_f , e desvio máximo, γ_{f-loc} .

Tabela 5.1 – Comparação entre os números de fatores WMPS e o modelo SPS para a distância de 1 comprimento de chama e $n=0,75N$. N é o número de fatores e n representa o ponto máximo de emissão considerado.

	Chama 1	N	8	20	40	60	SPS
Vazão [L/min]	30	γ_{f-norm} [%]	5,84	6,03	6,10	6,12	4,80
Diluição [%]	0	γ_f [W/m ²]	25,48	26,32	26,61	26,71	20,92
Vento Lateral [m/s]	0,5	γ_{f-loc} [W/m ²]	177,70	179,59	180,29	180,53	190,53

Percebe-se que a influência do número de fatores para o resultado final não é relevante, gerando uma diferença de menos de 1% para essa chama, como pode ser visto na primeira linha da tabela 5.1. Outro fator importante é como o modelo SPS encontrou resultados melhores do que o WMPS pois os resultados foram mais próximos do encontrado experimentalmente. Apesar de nesse caso específico ter sido encontrado valores melhores para o modelo SPS, na média geral das chamas, o WMPS consegue representá-las melhor. O total dos resultados está no Apêndice II. Além disso o ponto máximo em 0,75 comprimento de chama não é a melhor aproximação para essas chamas, como será discutido mais à frente.

Foi feita em seguida uma análise da melhor reta para representar os dados obtidos. Conforme descrito na metodologia, foram utilizadas 2 abordagens para distribuir os fatores de ponderação, uma sendo a definição de Oliveira, 2017 e a outra a definição da reta saindo do queimador. A tabela 5.2 apresenta a comparação entre as duas abordagens. Foram escolhidas 3 chamas com condições distintas de velocidade do vento lateral, diluição de CO₂ e vazão de combustível e a média geral de todos os valores para as 45 chamas para representar essa diferença. O restante dos dados está no Apêndice I.

Tabela 5.2 - Comparação entre a reta Oliveira, 2017 e reta saindo do queimador.

Vento Lateral [m/s]	Diluição [%]	Vazão Total [L/min]	Reta definida por Oliveira (Fig 4.2a)			Reta saindo do queimador (Fig. 4.2b)		
			γ_{f-loc} [W/m ²]	γ_f [W/m ²]	γ_{f-norm}	γ_{f-loc} [W/m ²]	γ_f [W/m ²]	γ_{f-norm}
0,5	0	30	179,597	26,325	0,060	168,292	21,653	0,050
1,0	20	20	374,433	50,368	0,047	276,815	39,282	0,037
1,5	10	20	534,222	89,636	0,083	425,421	78,907	0,073
Média geral			342,319	60,456	6,509%	289,996	51,771	5,557%

Percebe-se que a abordagem da reta saindo do queimador aproximou-se melhor dos dados experimentais. Isso pode ser explicado pelo fato do vento cruzado, em sua interação com a chama, carregar gases quentes de combustão na direção do vento, ou seja, a reta saindo do queimador consegue representar melhor a característica dos gases quentes abaixo da chama, enquanto a reta definida apenas sobre a chama perde essa informação. Portanto, será abordada com mais detalhes nos próximos resultados a chama com a aproximação de uma reta saindo do queimador. Entretanto, ainda será feita uma nova comparação mais à frente no momento do uso do método de otimização.

Na tabela 5.3 é feita uma comparação entre 2 chamas escolhidas para análise com mudança do ponto máximo de emissão. Os resultados para todas as chamas estão no Apêndice II.

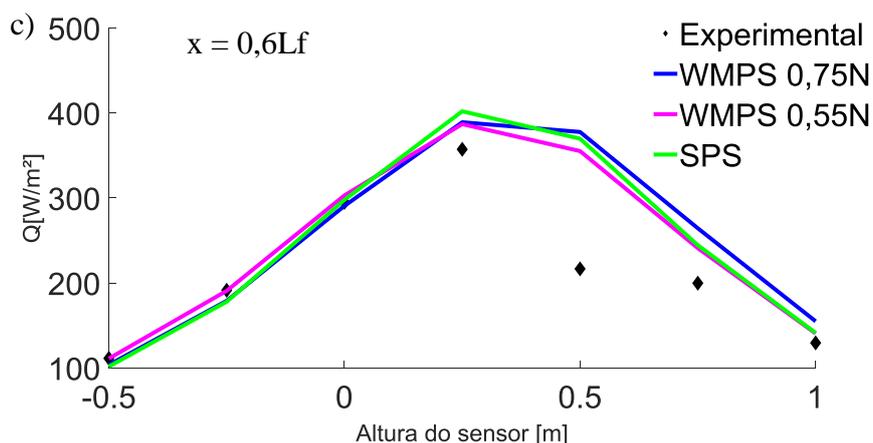
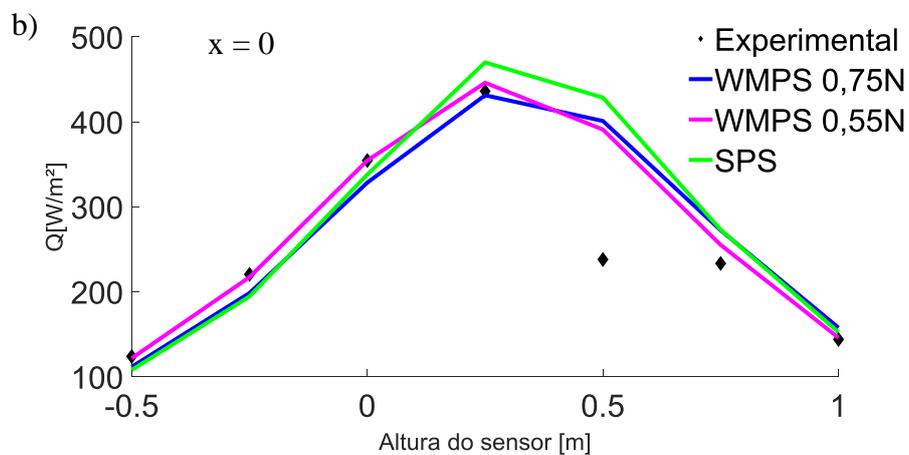
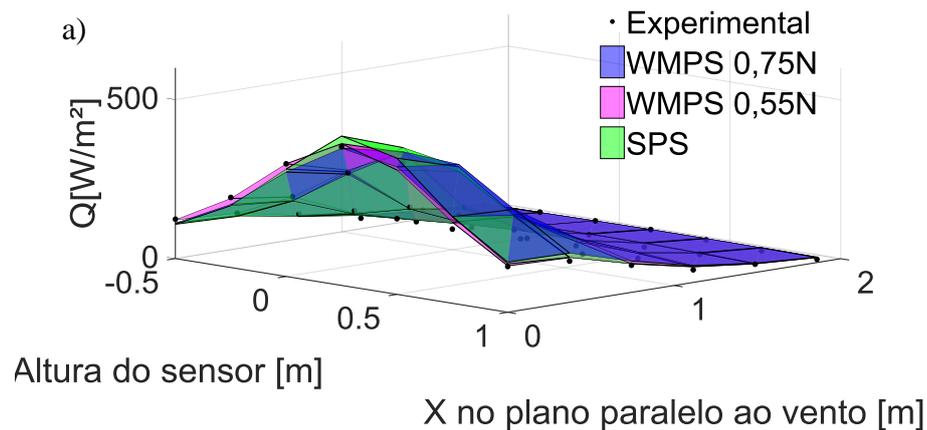
Tabela 5.3 - Comparação entre a chama 1 de vazão de 30 L/min, sem diluição e com 0,5 m/s de vento lateral com a chama 2 com vazão de 40 L/min, sem diluição e com vento lateral de 1,5 m/s para diferentes valores de n

n	0,85N	0,75N	0,65N	0,55N	0,50N	SPS
Chama 1	0,057	0,050	0,043	0,038	0,036	0,048
Chama 2	0,064	0,062	0,060	0,059	0,059	0,075
Média geral	5,758%	5,557%	5,444%	5,412%	5,422%	6,472%

Como pode-se verificar nas chamas aqui apresentadas, o ponto máximo ideal é diferente para cada chama. Na média geral, o ponto ideal para ser considerado o máximo está

em 0,55 do comprimento de chama. A Chama 1 da tabela não obedece a esse comportamento, tendo seu ponto máximo ainda antes disso. Outro fator interessante para essa chama, é que a mesma apresenta um resultado pior do que o modelo SPS para o caso de considerarmos o valor de 0,75 como máximo. Já a chama 2 tem um comportamento que se aproxima da média de todas as chamas. Essa diferença encontrada com relação aos valores obtidos e propostos por Hankinson e Lowesmith, 2012, pode ser devido à influência do vento cruzado.

A figura 5.1 contém um gráfico espacial que representa a comparação do modelo WMPS de $n=0,75$, $n=0,55$ e dados experimentais para a chama 3. Junto estão gráficos de corte em 3 planos paralelos de medição para facilitar a visualização e entendimento da distribuição dos valores de radiação.



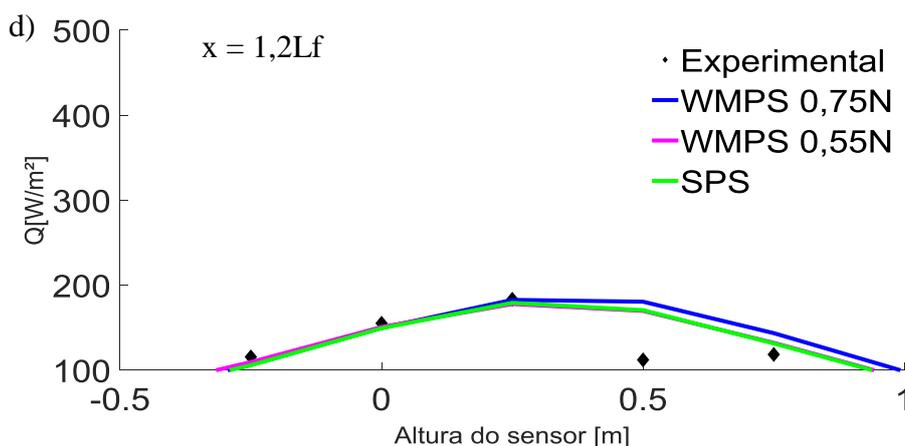


Figura 5.1 – Superfícies de radiação da chama de vazão total de 30L/min, diluição de 0% e vento cruzado de 0,5m/s. a) Distribuição tridimensional do fluxo de calor radiativo. b) Corte no plano de medições em $x = 0$. c) Corte no plano de medições em $x = 0,6L_f$. d) Corte no plano de medições em $x = 1,2L_f$.

Os gráficos mostram que há uma leve diferença entre os dois modelos estudados. Além disso, a diferença entre o ponto considerado o máximo (0,75N e 0,55N) para o WMPS teve uma mudança de poucos %, conforme esperado pelos valores apresentados na tabela 5.3. O último gráfico d) da figura 5.1 mostra uma diferença de fluxo de calor radiativo grande se comparado com os demais. Por já representar uma medição em pontos com 1,2 comprimentos de chama do queimador, significa que os sensores estão medindo a radiação da chama com um determinado ângulo e também a radiação dos gases resultantes da combustão. Na parte das medições experimentais, percebe-se uma grande queda no valor medido entre 0,25 e 0,5m de altura do sensor, difícil de ser aproximada pelos métodos estudados. Essa característica pode ser explicada pelo fato de o vento cruzado influenciar a geometria da chama, ou seja, nesse ponto de grande variação, os sensores não estão diretamente na frente da chama, resultando neste tipo de comportamento.

Foi realizada em seguida a análise utilizando o método de otimização GEO. Para parâmetros livres, ou seja, cada peso pode assumir qualquer valor entre 0 e 1, desde que a soma final entre todos os pesos seja 1, foram encontrados os resultados demonstrados na tabela 5.4. Para essas simulações, o valor da fração radiativa foi considerado uma variável a ser otimizada também. Nessa etapa foram feitos testes da influência do número de fontes utilizando o GEO para caso dos fatores livres.

Tabela 5.4 Resultado GEO para pesos de ponderação livres

	8 fontes	20 fontes	40 fontes	60 fontes
γ_{f-norm} [%]	2,74	2,74	2,76	2,76
γ_f [W/m ²]	11,96	11,96	12,04	12,06
γ_{f-loc} [W/m ²]	121,53	122,75	125,34	125,39

Novamente o número de pesos mostrou pouca diferença no resultado final. Os resultados encontrados, se comparados com o modelo WMPS padrão, são bem melhores. Todavia, a utilização de pesos livres não consegue alcançar uma simplificação do problema, visto que cada chama e cada caso encontrará pesos únicos que funcionam apenas para esse caso específico, sem conseguir-se chegar em uma função que represente um número maior de casos.

Para obter-se uma melhor solução, foi proposta uma distribuição de pesos em função de uma equação de segundo grau com concavidade para baixo. Na tabela 5.5 estão os resultados para uma chama individual, bem como resultados encontrados para 3 conjuntos de 5 chamadas. Os 9 conjuntos de 5 chamadas estão no Apêndice III. Para obtenção dos resultados, a fração radiativa usada foi a média de todas as chamadas medidas, multiplicada por um fator de ajuste, resultando em uma fração individual ajustada para cada chamada.

Tabela 5.5 – Comparação de valores para a chamada 1 estudada anteriormente e 3 conjuntos de 5 chamadas. Para cada conjunto de chamada, manteve-se constante os parâmetros especificados na tabela, porém variou-se a vazão total.

	Chama 1	Vento - 0,5 - 0%	Vento - 1,0 - 20%	Vento - 1,5 - 0%
$\gamma_{f-norm}[\%]$	2,733	4,632	9,987	5,995
$\gamma_f [W/m^2]$	11,914	17,875	113,051	65,127
$\gamma_{f-loc} [W/m^2]$	127,929	126,362	530,040	295,609

Como pode ser constatado, fazer a otimização para uma chamada individual de fato resulta em uma aproximação melhor, porém a otimização para mais de uma chamada em conjunto também é capaz de gerar resultados generalizados.

Por final, todas as 45 chamadas foram simuladas para que se encontre uma solução geral. A fração radiativa, por ser diretamente proporcional à radiação medida é de fundamental importância para o resultado final. Portanto, foram simuladas duas abordagens, uma utilizando a fração média multiplicada por um fator de ajuste (fração ajustada) e a outra abordagem utilizando a correlação de Oliveira, 2017 (pesos com correlação) para as frações radiantes individuais. As comparações estão na figura 5.2 e 5.3.

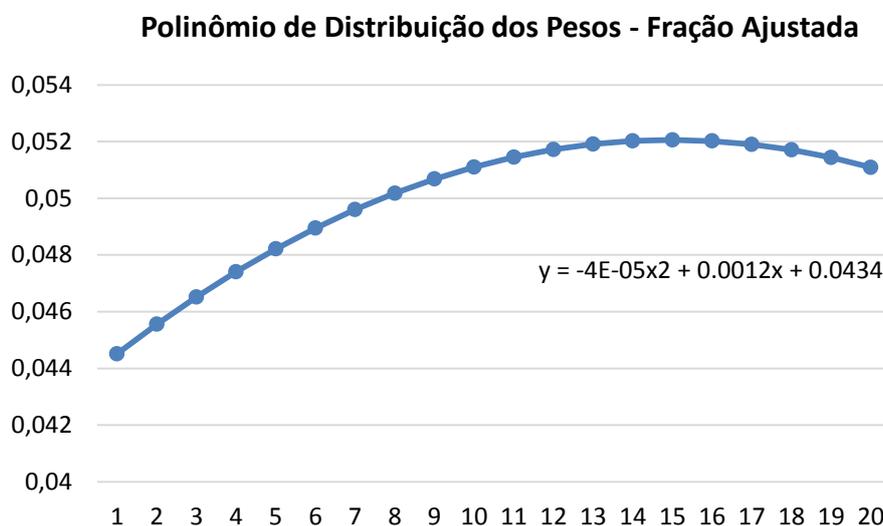


Figura 5.2 – Curva dos pesos encontrada para a fração radiante ajustada

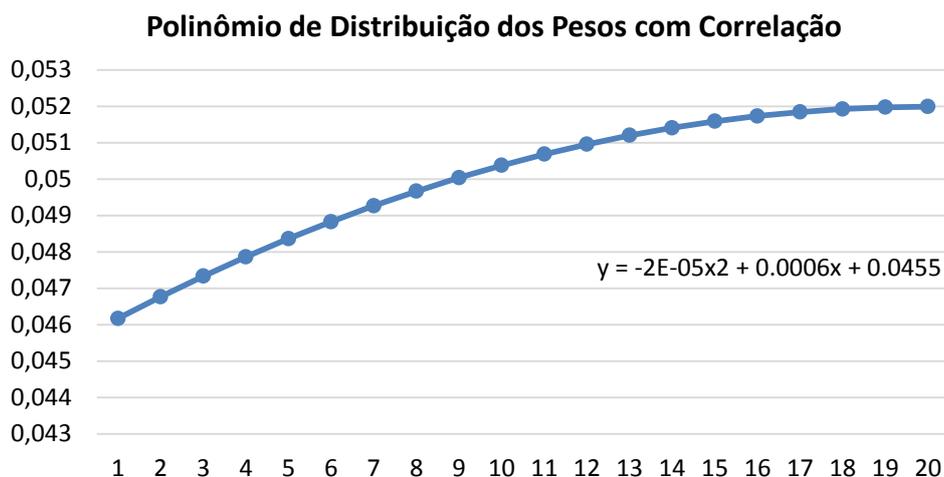


Figura 5.3 – Curva dos Pesos encontrada utilizando a fração radiante por meio de correlação

Na tabela 5.6 estão os valores médios encontrados para todas as chamas para as duas abordagens.

Tabela 5.6 – Valores médios de todas as chamas.

	Fração ajustada	Fração correlação
γ_{norm} [%]	7,026	5,521
γ [w/m ²]	61,335	51,056
Média γ_{f-loc} [W/m ²]	274,127	217,105

Os resultados finais encontrados foram melhores para o polinômio dos pesos em que se usou a correlação encontrada experimentalmente para determinar o valor da fração radiante. A figura 5.4 demonstra o porquê, mesmo com a utilização do GEO para achar o melhor valor de fração radiante no primeiro caso, ele não achou o melhor resultado geral.

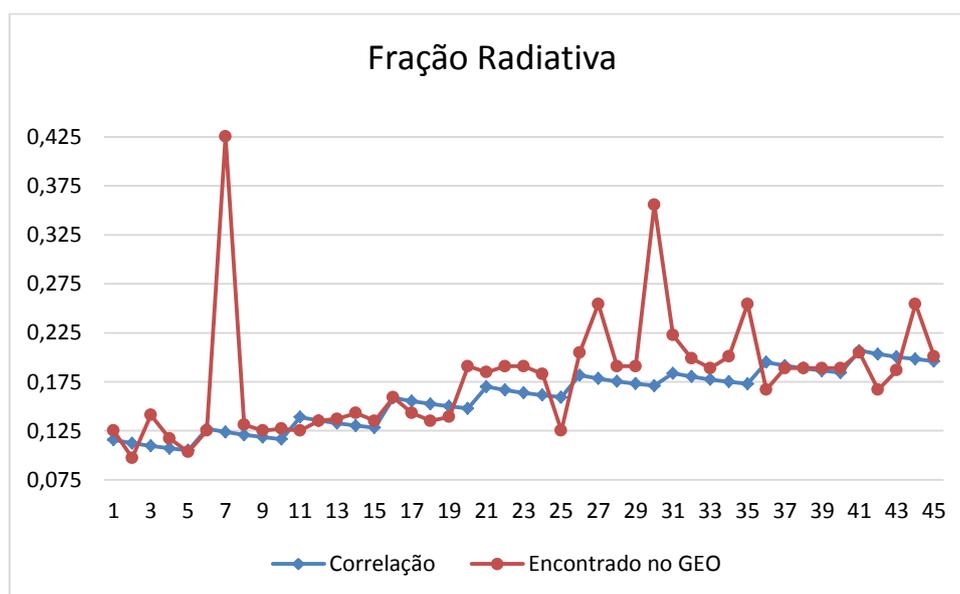


Figura 5.4 – Distribuição dos valores das frações radiantes para cada chama utilizando o GEO para achar um fator de ajuste.

Como pode-se observar, há casos de chamas com picos de fração radiante, que acabam distorcendo a média final de todas as chamas. Por ser um fator diretamente proporcional à radiação medida, pequenas variações em seu valor acabam afetando drasticamente o valor calculado. Por isso, uma correlação experimental de valores mostrou-se mais eficaz na solução do problema proposto.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho abordou o teste de modelos de previsão do fluxo de calor radiativo SPS e WMPS em chamas difusivas de gás natural diluído em CO₂ e sujeitas a um escoamento cruzado de ar, mimetizando em escala de laboratório casos reais de *flares* empregados na indústria de petróleo e gás natural.

A comparação feita entre os modelos de engenharia SPS e WMPS apresentaram resultados satisfatórios para a resolução do problema de uma chama com vento lateral. Apesar de pontualmente o modelo SPS poder apresentar resultados melhores, de maneira global o WMPS consegue prever mais fielmente o comportamento do fluxo radiante das chamas estudadas.

Mostrou-se que o número de parâmetros do modelo WMPS tem pouca influência nos resultados. Uma reta saindo do queimador demonstrou representar melhor os dados experimentais e a posição a ser considerada do ponto máximo encontrada foi de $n=0,55N$.

Naturalmente a utilização do método GEO com parâmetros livres foi a abordagem que alcançou os melhores resultados, porém sem real utilidade prática para solução do problema. A distribuição por meio de uma equação quadrática mostrou bons resultados, em conjunto com a utilização de uma correlação experimental para determinar a fração radiante.

O trabalho abre possibilidades de continuidade considerando a distribuição dos pesos em uma função que descreva mais fielmente a geometria da chama, e não apenas uma simplificação linear. Além disso, pode-se aprofundar no estudo e determinação da fração radiante, que apresentou grande influência nos resultados finais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

Costa, O. N.; **“Análise de radiação emitida por chamas turbulentas de gás natural”**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

Enerdata – Global Energy Statistical Yearbook 2017; **“Total energy consumption”**, <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>. Acessado em 05/12/2017

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

GasNet – O site do gás natural; **“Composição do Gás Natural Comercial”**, http://gasnet.com.br/gasnatural/gas_completo.asp. Acessado em 05/12/2017.

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

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

Markstein, G. H.; **“Measurements on Gaseous-Fuel Pool Fires with a Fiber-optic Absorption Probe”**, Combustion Science and Technology, vol. 39, Iss. 1-6, 1984.

Miguel, R. B.; **“Aplicação da análise inversa para determinar os parâmetros do modelo de múltiplas fontes ponderadas para estimar o fluxo de calor de uma chama do tipo jato laminar de metano-ar”**, Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

Modak, A.T.; **“Thermal radiation from pool fires”**, Combustion and Flame, vol. 29, pp 177-192, 1977.

Nonaka, H.; Pereira, F. **“Experimental and numerical study of CO₂ content effects on the laminar burning velocity of 15iogas”**, Fuel, vol.182, pp. 382-390, 2016.

Oliveira, T. B.; **“Análise das propriedades geométricas e radiativas de chamas turbulentas difusivas de gás natural com diluição de CO₂ e interação de um escoamento transversal de ar”**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

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

Sousa, F. L.; Ramos, F. M.; Paglione, P.; Girardi, R. M.; **“New stochastic algorithm for design optimization”**, AIAA jornal, vol. 41, 2003.

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

Zhou, K.; Jiang, J. **“Thermal radiation from vertical turbulent jet flame: line source model”**, Journal of Heat Transfer, vol. 138, 216.

APÊNDICE I

Tabela I – Resultados para a comparação entre as abordagens apresentadas nas figura 4.2a e figura 4.2b.

Vento Lateral [m/s]	Diluição [%]	Vazão Total [L/min]	Reta definida por Tiago (Fig 4.2a)			Reta saindo do queimador (Fig. 4.2b)		
			γ_{f-loc} [W/m ²]	γ_f [W/m ²]	γ_{f-norm}	γ_{f-loc} [W/m ²]	γ_f [W/m ²]	γ_{f-norm}
0,5	0	20	96.206	25.064	0.048	94.582	26.565	0.051
		25	222.082	32.029	0.104	210.372	30.272	0.098
		30	179.597	26.325	0.060	168.292	21.653	0.050
		35	103.963	20.631	0.055	96.011	17.025	0.045
		40	98.785	17.703	0.053	93.874	14.934	0.045
	10	20	172.682	20.087	0.040	146.924	16.258	0.032
		25	152.011	22.610	0.048	131.800	17.633	0.037
		30	184.613	22.119	0.049	168.221	17.551	0.039
		35	182.606	21.817	0.049	170.142	17.697	0.040
		40	186.266	21.066	0.045	173.638	16.566	0.036
	20	20	141.784	19.216	0.035	113.867	15.616	0.029
		25	165.563	17.643	0.034	140.029	14.762	0.029
		30	143.729	17.318	0.033	120.388	14.660	0.028
		35	142.243	15.248	0.029	122.183	13.445	0.025
		40	184.980	16.631	0.032	163.341	16.889	0.033
1,0	0	20	247.429	57.713	0.071	206.659	44.929	0.055
		25	233.991	50.930	0.081	197.048	40.991	0.065
		30	297.023	53.858	0.079	256.425	43.855	0.064
		35	329.260	54.379	0.073	285.896	46.565	0.062
		40	496.801	65.623	0.068	430.439	51.202	0.053
	10	20	217.535	78.221	0.088	179.845	68.769	0.078
		25	230.371	83.798	0.098	189.527	73.562	0.086
		30	251.107	89.209	0.093	194.059	76.589	0.080
		35	432.939	62.777	0.070	359.374	50.177	0.056
		40	495.506	65.812	0.068	415.650	51.084	0.053
	20	20	374.433	50.368	0.047	276.815	39.282	0.037
		25	293.531	66.850	0.049	241.207	52.169	0.039
		30	429.175	64.494	0.067	354.839	56.336	0.058
		35	401.176	60.528	0.054	350.063	54.802	0.049
		40	310.752	51.695	0.045	285.528	49.989	0.044
1,5	0	20	390.417	88.585	0.067	380.240	80.315	0.061
		25	394.948	80.889	0.078	322.509	69.282	0.066
		30	445.242	85.578	0.083	385.256	73.544	0.072
		35	440.014	80.201	0.076	375.603	66.007	0.063
		40	440.901	74.126	0.075	378.958	61.378	0.062
	10	20	534.222	89.636	0.083	425.421	78.907	0.073
		25	509.599	87.681	0.077	413.030	75.415	0.066
		30	488.097	88.606	0.075	396.767	75.088	0.064
		35	488.998	89.277	0.076	410.432	75.583	0.064
		40	448.109	79.368	0.067	368.793	66.467	0.056
	20	20	706.716	108.542	0.062	539.418	96.670	0.055
		25	844.259	118.221	0.096	673.925	103.449	0.084
		30	977.345	134.388	0.092	792.625	117.927	0.080
		35	419.706	116.982	0.076	396.890	105.583	0.068
		40	477.634	126.691	0.080	452.924	112.233	0.070
	Média		342.319	60.456	6.509%	289.996	51.771	5.557%

APÊNDICE II

Tabela II – Comparação do ponto de máxima emissão para todas as chamas

Vento Lateral [m/s]	Diluição [%]	Vazão Total [L/min]	n					SPS
			0,85N	0.75N	0.65N	0.55N	0.50N	
0,5	0	20	0.049	0.051	0.052	0.055	0.056	0.052
		25	0.101	0.098	0.096	0.094	0.093	0.099
		30	0.057	0.050	0.043	0.038	0.036	0.048
		35	0.051	0.045	0.040	0.035	0.033	0.040
		40	0.050	0.045	0.042	0.040	0.040	0.044
	10	20	0.035	0.032	0.030	0.030	0.030	0.036
		25	0.043	0.037	0.032	0.028	0.027	0.033
		30	0.045	0.039	0.034	0.030	0.029	0.036
		35	0.045	0.040	0.035	0.033	0.032	0.039
		40	0.041	0.036	0.032	0.032	0.033	0.037
	20	20	0.032	0.029	0.027	0.027	0.028	0.032
		25	0.031	0.029	0.029	0.030	0.031	0.032
		30	0.030	0.028	0.028	0.029	0.030	0.031
		35	0.027	0.025	0.027	0.030	0.032	0.027
		40	0.031	0.033	0.037	0.041	0.042	0.039
1,0	0	20	0.059	0.055	0.053	0.051	0.050	0.069
		25	0.070	0.065	0.059	0.056	0.054	0.072
		30	0.069	0.064	0.061	0.058	0.056	0.073
		35	0.065	0.062	0.060	0.057	0.056	0.068
		40	0.057	0.053	0.051	0.050	0.050	0.063
	10	20	0.079	0.078	0.076	0.075	0.074	0.090
		25	0.088	0.086	0.084	0.083	0.082	0.097
		30	0.083	0.080	0.077	0.076	0.075	0.089
		35	0.059	0.056	0.054	0.053	0.053	0.067
		40	0.058	0.053	0.050	0.049	0.049	0.063
	20	20	0.037	0.037	0.037	0.038	0.038	0.050
		25	0.039	0.039	0.038	0.039	0.039	0.051
		30	0.058	0.058	0.058	0.061	0.062	0.071
		35	0.048	0.049	0.052	0.055	0.056	0.061
		40	0.040	0.044	0.047	0.051	0.052	0.054
1,5	0	20	0.060	0.061	0.062	0.062	0.063	0.075
		25	0.067	0.066	0.066	0.065	0.065	0.084
		30	0.072	0.072	0.071	0.071	0.071	0.087
		35	0.065	0.063	0.062	0.063	0.063	0.078
		40	0.064	0.062	0.060	0.059	0.059	0.075
	10	20	0.074	0.073	0.074	0.074	0.074	0.093
		25	0.067	0.066	0.066	0.066	0.066	0.084
		30	0.064	0.064	0.063	0.063	0.062	0.080
		35	0.065	0.064	0.064	0.064	0.064	0.080
		40	0.056	0.056	0.057	0.059	0.060	0.074
	20	20	0.054	0.055	0.056	0.057	0.057	0.071
		25	0.085	0.084	0.084	0.084	0.084	0.104
		30	0.080	0.080	0.081	0.082	0.082	0.098
		35	0.067	0.068	0.070	0.072	0.073	0.082
		40	0.070	0.070	0.072	0.075	0.076	0.085
Média			5.758%	5.557%	5.444%	5.412%	5.422%	6.472%

APÊNDICE III

Tabela III – Resultados para os grupos de 5 chammas

Vento Lateral [m/s]	Diluição [%]	γ_{f-loc} [W/m ²]	γ_f [W/m ²]	γ_{f-norm} [%]
0,5	0	126,362	17,875	4,6325
	10	352,134	76,68	16,258
	20	126,102	14,266	2,714
1,0	0	199,475	38,298	4,985
	10	283,999	63,573	6,978
	20	530,04	113,05	9,987
1,5	0	295,609	65,127	5,995
	10	249,777	65,882	5,742
	20	427,304	91,584	6,122