



Luis Enrique Alva Huapaya

**Caracterização numérica e experimental de uma chama
turbulenta não pré-misturada**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da
PUC-Rio.

Orientadores: Luís Fernando Figueira da Silva
Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Rio de Janeiro
abril de 2008

Luis Enrique Alva Huapaya

**Caracterização numérica e experimental de uma chama
turbulenta não pré-misturada**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luís Fernando Figueira da Silva

Orientador

Departamento Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Co-Orientador

Departamento Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Departamento Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Ricardo Serfaty

Petróleo Brasileiro S. A.

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de abril de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Luis Enrique Alva Huapaya

Formado em Engenharia Mecânica de Fluidos pela Universidade Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú, em Agosto de 2002. Desde 2003 até 2005 atuou como engenheiro de projetos em diversas empresas peruanas, na área marítima e de fabricação metal-mecânica.

Ficha Catalográfica

Huapaya, Luis Enrique Alva

Caracterização numérica e experimental de uma chama turbulenta não pré-misturada / Luis Enrique Alva Huapaya ; orientador: Luís Fernando Figueira da Silva, Luis Fernando Alzuguir Azevedo. – 2008.

169 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica –Teses. 2. Fluorescência induzida por laser. 3. Combustão. 4. Turbulência. I. Silva, Luís Fernando Figueira da. II. Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CCD:621

Para Deus, meus pais Alberto e Angélica, e meus irmãos Silvana e Carlos
pelo infinito amor e apoio para a realização deste mestrado.

Agradecimentos

A meu orientador o Professor Luis Fernando Figueira da Silva pelo apoio, confiança, incentivo e dedicação para a realização deste trabalho e durante todo o mestrado.

À meu co-orientador o Professor Luis Fernando Alzuguir Azevedo pelo apoio e dedicada orientação durante o desenvolvimento desta dissertação.

A meus pais Alberto e Angélica, assim como meus irmãos Silvana e Carlos pelo imenso amor e apoio incondicional em toda minha vida.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, pelos momentos compartilhados e conselhos assimilados durante todo meu mestrado.

A PETROBRAS (CENPES), pelo suporte financeiro no presente trabalho.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao todas as pessoas que ajudaram diretamente em minha estadia em Brasil, em especial, para meu amigo e companheiro de graduação e aluno de pós-graduação do Departamento de Civil-PUC-Rio, Roberto Quevedo Quispe por sua amizade desinteressada e verdadeira, a Carla Matos da Rocha e família pelo apoio, carinho e paciência oferecida desinteressadamente.

Resumo

Huapaya, Luis Enrique Alva; da Silva, Luis Fernando Figueira; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. **Caracterização numérica e experimental de uma chama turbulenta não pré-misturada**. Rio de Janeiro, 2008. 169p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho se apresenta um estudo experimental e numérico de escoamentos turbulentos quimicamente reativos em um queimador tipo obstáculo. O objetivo principal é estudar uma chama turbulenta não pré-misturada de configuração geométrica simples. Esta chama, que queima gás natural e ar, é estabilizada por um queimador tipo obstáculo. Inicialmente um estudo bibliográfico do estado da arte de experimentos e da comparação entre experimentos e modelagem neste tipo de queimador é apresentado. Na sequência, a formulação matemática, clássica, de dinâmica dos fluidos computacional é exposta, seguida da apresentação da técnica de medição empregada nos experimentos, a fluorescência induzida por plano laser (PLIF). A discussão dos resultados obtidos neste trabalho é dividida em três etapas. Na primeira, comparam-se os resultados de modelagem computacional usando quatro modelos de turbulência e dois modelos de combustão com dados experimentais encontrados na literatura. Esta comparação coloca em evidência o conjunto de modelos que possui melhor capacidade preditiva no que diz respeito a este tipo de configuração. A segunda etapa consiste na apresentação dos resultados experimentais obtidos, os quais permitem caracterizar, em três regimes de combustão distintos, a presença de uma espécie química existente durante o processo de combustão, no caso, o radical hidroxila (OH). Esta caracterização é realizada pelo exame tanto da estrutura instantânea da chama turbulenta quanto da média. Por fim, comparam-se os resultados da modelagem com aqueles obtidos no presente aparato experimental. Esta comparação coloca em evidência as deficiências dos modelos clássicos de combustão empregados e indica a necessidade de serem realizadas medidas simultâneas de velocidade e de concentração de espécies químicas que possibilitem o desenvolvimento de novos modelos de combustão em escoamento turbulento.

Palavras – chave

Fluorescência induzida por laser, combustão, turbulência.

Abstract

Huapaya, Luis Enrique Alva; da Silva, Luís Fernando Figueira; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. **Numerical and experimental characterization of a non-premixed turbulent flame.** Rio de Janeiro, 2008. 150p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents an experimental and numerical study of turbulent chemically reactive flows in a bluff body type burner. The main objective of the present work is to study a non-premixed turbulent flame on a simple geometric configuration. This flame, which burns natural gas and air, is stabilized downstream to a bluff-body. Initially, literature is reviewed on the previous experimental and modeling studies which have been performed on this kind of burner. Then, the mathematical formulation of computational fluid dynamic problem is presented. This is followed by the introduction of the experimental measurements techniques which involve planar laser induced fluorescence (PLIF). The discussion of results obtained in this work is divided in three sections. First, a comparison is made between numerical simulations, using four different turbulent models and two different combustion models, and experimental data found in the literature. It allows to assess capacity of the different models to predict the reactive flow configuration studied. The second section presents the experimental results obtained for three combustion regimes, which are characterized by laser induced fluorescence emission of the hydroxyl radical species (OH). This characterization involves the analysis the instantaneous and the average structure of the turbulent flame. Finally, the modeling results are compared to the experimental data obtained. This comparison evidences the necessity to perform the simultaneous measurement of velocity and chemical species concentration in order to allow for the development of new models of combustion in turbulent flows.

Keywords

Laser induced fluorescence, combustion, turbulence.

Sumário

1	Introdução	22
2	Revisão Bibliográfica	27
2.1	Estudos experimentais	28
2.2	Estudos Numéricos para um queimador tipo obstáculo	44
2.3	Influencia da escolha dos modelos de turbulência na predição da combustão turbulenta	54
3	Metodologia Numérica	57
3.1	Formulação matemática do problema	57
3.1.1	Equações de transporte	57
3.1.2	Equações básicas para modelagem da turbulência	59
3.1.3	Modelo de turbulência $\kappa-\epsilon$	61
3.1.4	Modelo de turbulência RNG $\kappa-\epsilon$	62
3.1.5	Modelo de turbulência $\kappa-\omega$	64
3.1.6	Modelo de turbulência de Transporte de Tensões cisalhantes-SST	66
3.1.7	Equações básicas para modelagem da combustão	68
3.1.8	Modelo de combustão EDM (Eddy Dissipation Model)	69
3.1.9	Modelo de elementos de chama (Flamelet)	70
3.2	Domínios e malhas computacionais utilizados	72
3.3	Condições de contorno	77
3.4	Método numérico de solução	80
4	Metodologia Experimental	81
4.1	Projeto da instalação experimental	81
4.1.1	Fixação do corpo rombudo	81
4.1.2	Fornecimento do GNV	84
4.1.3	Escoamento de Ar	87
4.2	Análise de incertezas experimentais	94

4.2.1	A natureza das incertezas experimentais	94
4.2.2	Propagação de incertezas	95
4.2.3	Determinação da incerteza do número de Reynolds	95
4.3	Sistema de Fluorescência Induzida por plano laser (PLIF)	98
4.3.1	Fluorescência induzida por laser (LIF)	98
4.3.2	Fluorescência induzida por plano laser (PLIF)	101
4.3.3	Principais componentes do PLIF	102
4.3.3.1	Laser de bombeamento Nd:YAG	103
4.3.3.2	Obturador (Shutter)	104
4.3.3.3	Laser de Corante (Dye)	104
4.3.3.4	Monitor de Energia	105
4.3.3.5	Sistema Óptico de criação do plano laser	106
4.3.3.6	Câmara intensificadora (ICCD)	107
4.3.3.7	Sistema de análise, processamento e visualização de dados	108
5	Análise de Resultados e discussões	109
5.1	Comparações com os resultados experimentais de Schefer et al.	109
5.1.1	Escoamento inerte	110
5.1.2	Escoamento Reativo	125
5.2	Resultados Experimentais	128
5.2.1	Classificação das chamas estudadas	128
5.2.2	Processo de filtragem	130
5.2.3	Chamas do tipo V	132
5.2.4	Chamas do tipo I	140
5.2.5	Chamas do tipo II	151
5.3	Comparação dos resultados experimentais com a modelagem Numérica	153
5.3.1	Chamas tipo V	153
5.3.2	Chamas tipo I e II	157
6	Conclusões e perspectivas	162
7	Referências Bibliográficas	165

Lista de figuras

Figura 1.1 - Esquema do queimador tipo obstáculo (Bluff Body) uma chama turbulenta livre	24
Figura 1.2 - Fotografia do queimador tipo obstáculo em regime turbulento de combustão com de Reynolds do GNV de 7235	25
Figura 2.1.1 - Campo de vetores da velocidade média para o escoamento (a) inerte (b) reativo	31
Figura 2.1.2 - Variação da velocidade média na linha central nos casos inerte e reativo	32
Figura 2.1.3 - Classificação das chamas proposta por Huang e Lin	35
Figura 2.1.4 - Localizações das três camadas de mistura	36
Figura 2.1.5 - Evolução radial das frações mássicas de OH em diferentes localizações longitudinais da chama HC1 ■ e HC2 ▽	37
Figura 2.1.6 - Regimes característicos do escoamento e chamas segundo Huang	38
Figura 2.1.7 - Vetores velocidade e linhas de corrente no regime de pré-penetração	39
Figura 2.1.8 - Vetores velocidade e linhas de corrente do regime de penetração	40
Figura 2.1.9 - Evolução longitudinal instantâneo da componente longitudinal de velocidade, obtidas com o PIV	41
Figura 2.1.10 - Diagrama dos regimes de estabilização para combustão com ar úmido	42
Figura 2.1.11 - Características da chama para combustão com ar Úmido	43
Figura 2.1.12 - Comparações dos limites para casos de ar úmido e seco.	43
Figura 2.2.1 - Domínio computacional e condições de contorno	43
Figura 2.2.2 - Velocidade longitudinal na linha central da base do	

queimador	45
Figura 2.2.3 - Velocidade longitudinal na linha central para os casos	46
Figura 2.2.4 - Evolução radial da fração mássica de OH	47
Figura 2.2.5 - Evolução radial da fração mássica do NO	48
Figura 2.2.6 - Esquema do domínio computacional	50
Figura 2.2.7 - Evolução radial da velocidade longitudinal média a jusante do corpo rombudo caso HM1	51
Figura 2.2.8 - Linhas de corrente calculadas para HM1 e HM3	52
Figura 2.2.9 - Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade média	53
Figura 2.2.10 - Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade média na posição $x=1.8D_b$	53
Figura 2.3.1 - Evolução longitudinal na linha central do queimador da media da fração de mistura	55
Figura 2.3.2 - Domínio computacional da configuração “Sydney/Sandia”	55
Figura 2.3.3 - Comparações dos perfis de velocidade longitudinal com dados experimentais	56
Figura 3.1 - Domínio computacional das duas malhas finais, com suas condições de contorno numeradas	77
Figura 4.1 - Diagrama da seção transversal do queimador mostrando as características geométricas de construção.	82
Figura 4.2 - Características geométricas das peças 1, 2 e 3 que servem como fixação e nivelamento do corpo rombudo.	83
Figura 4.3 - No lado esquerdo a configuração antiga do queimador, no lado direito a nova configuração	88
Figura 4.4 - Dimensões geométricas da caixa tranqüilizadora do ar anular.	88
Figura 4.5 - Esquema usado para obter a velocidade do ar na seção anular do queimador.	89
Figura 4.6 - Evolução da velocidade nos eixos (a) $X=0$, (b) $Z=0$ na saída do duto ar anular (40 Hz)	90

Figura 4.7 - Velocidade no anular para diferentes valores da frequência do ventilador para a configuração atual. (a) $X=0$; b) $Z=0$.	91
Figura 4.8 - Linhas iso-cinéticas para 30Hz (a) e 50Hz (b).	93
Figura 4.9 - Representação dos estados energéticos da molécula	99
Figura 4.10 - Diagrama de Jablonski modificado	100
Figura 4.11 - Esquema de identificação dos componentes do PLIF	102
Figura 4.12 - Configuração experimental para o PLIF	103
Figura 4.13 - Relação entre o ângulo de abertura α , o comprimento focal f e o diâmetro do feixe laser d .	107
Figura 5.1.1.1 - Campo de vetores do escoamento quimicamente inerte obtidos por Schefer	110
Figura 5.1.1.2 - Componente longitudinal da velocidade ao longo da linha central do queimador comparação entre os casos 1 e 2 e os resultados experimentais	111
Figura 5.1.1.3 - Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para $Y=10$ e 40mm , escoamento inerte	112
Figura 5.1.1.4 - Representação da componente longitudinal da velocidade na linha central para as malhas 2 e 3 comparadas aos dados experimentais da literatura	113
Figura 5.1.1.5 - Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para as malhas 2 e 3	114
Figura 5.1.1.6 - Representação da componente longitudinal da velocidade na linha central com modelos de turbulência SST, $\kappa-\epsilon$, RNG e $\kappa-\omega$ comparada aos dados experimentais da literatura	116
Figura 5.1.1.7 - Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para os casos 3, 4, 5 e 6 em duas linhas horizontais, $Y=10\text{mm}$, e $Y=40\text{mm}$.	117
Figura 5.1.1.8 - Representação da componente longitudinal da velocidade na linha central com o modelo de turbulência SST dos casos 10 e 11, comparada aos dados experimentais da literatura	118
Figura 5.1.1.9 - Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para os casos 7 e 8 em duas linhas horizontais, $Y=10\text{mm}$, e $Y=40\text{mm}$.	119

Figura 5.1.1.10 - Representação da componente longitudinal da velocidade na linha central com o modelo de turbulência κ - ϵ dos casos 9 e 10, comparada aos dados experimentais da literatura	121
Figura 5.1.1.11 - Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para os casos 9 e 10 em duas linhas horizontais, $Y=10\text{mm}$, e $Y=40\text{mm}$.	121
Figura 5.1.1.12 - Representação da componente longitudinal da velocidade na linha central com o modelo de turbulência SST dos casos 11, 12 e 13, comparada aos dados da literatura	123
Figura 5.1.1.13 - Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para os casos 11, 12 e 13 em duas linhas horizontais, $Y=10\text{mm}$, e $Y=40\text{mm}$.	124
Figura 5.1.2.1 - Campo de vetores do escoamento reativo obtidos por Schefer	125
Figura 5.1.2.2 - Componente longitudinal da velocidade ao longo da linha central do queimador comparação entre os casos reativos, e os resultados experimentais	126
Figura 5.1.2.3 - Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para $Y=10$ e 60mm , escoamento reativo	127
Figura 5.2.1.1 - Identificação das chamas estudadas segundo a classificação proposta por Gu et al.[13] e Huang e Lin [8].	129
Figura 5.2.2.1 - Chama quase laminar tomada como referência para aplicação dos diferentes filtros lineares	130
Figura 5.2.2.2 - Filtros lineares “smoothing” aplicados sobre uma imagem instantânea da intensidade de fluorescência de OH	131
Figura 5.2.2.3 - Filtros lineares “Gaussianos” aplicados sobre uma imagem instantânea da intensidade de fluorescência de OH	132
Figura 5.2.3.1 - Fotografia da chama do caso 1 ($U_j=1,31\text{m/s}$ e $U_a=1,24\text{m/s}$).	133
Figura 5.2.3.2 - Imagem média, o RMS e instantânea da Concentração de OH obtidas com PLIF.	133
Figura 5.2.3.3 - Evolução vertical na chama da intensidade média de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para	

o caso 1.	134
Figura 5.2.3.4 - Fotografias da chama do caso 2 com tempo de exposição de 1/200 e 1/1000 respectivamente.	135
Figura 5.2.3.5 - Imagem média, RMS e instantânea da intensidade de fluorescência de OH obtidas com PLIF para $U_j=2,19\text{m/s}$ e $U_a=1,24\text{m/s}$ (caso 2)	135
Figura 5.2.3.6 - Evolução vertical na chama da intensidade média de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 2	136
Figura 5.2.3.7 - Fotografias da chama do caso 3 com tempo de exposição de 1/200 e 1/1000 segundos respectivamente.	136
Figura 5.2.3.8 - Imagem média de 1000 imagens, RMS e 4 imagens instantâneas da intensidade de fluorescência de OH obtidas com PLIF para $U_j=2,92\text{m/s}$ e $U_a=1,24\text{m/s}$ (caso 3).	137
Figura 5.2.3.9 - Evolução vertical na chama da intensidade média de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 3.	137
Figura 5.2.3.10 - Fotografias da chama do caso 4 com tempo de exposição de 1/200 e 1/1000 segundos respectivamente.	138
Figura 5.2.3.11 - Imagem média de 1000 imagens, seu RMS e 4 imagens instantâneas da intensidade de fluorescência de OH obtidas com PLIF para $U_j=6,9\text{m/s}$ e $U_a=1,24\text{m/s}$ (caso 4).	139
Figura 5.2.3.12 - Evolução vertical na chama da intensidade média de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 4.	139
Figura 5.2.4.1 - Fotografia direta da chama para o caso 5 com tempo de exposição de 1/1000 segundos.	140
Figura 5.2.4.2 - A primeira imagem é a média de 1000 imagens, o RMS e 4 imagens instantâneas da concentração de OH obtidas com PLIF para $U_j=1,31\text{m/s}$ e $U_a=6,6\text{m/s}$ (caso 5).	141
Figura 5.2.4.3 - Evolução vertical na chama da intensidade média de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 5.	142

Figura 5.2.4.4 - Fotografia direta da chama para o caso 6 com tempo de exposição de 1/500 segundos.	142
Figura 5.2.4.5 - A primeira imagem é a média de 1000 imagens, o RMS e 4 imagens instantâneas da concentração de OH obtidas com PLIF para $U_j=2,19\text{m/s}$ e $U_a=6,6\text{m/s}$ (caso 6).	143
Figura 5.2.4.6 - Evolução vertical na chama da intensidade média de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 6.	143
Figura 5.2.4.7 - Fotografia direta da chama para o caso 7 com tempo de exposição de 1/500 segundos.	144
Figura 5.2.4.8 - A primeira imagem é a média de 1000 imagens, o RMS e 4 imagens instantâneas da concentração de OH obtidas com PLIF para $U_j=2,92\text{m/s}$ e $U_a=6,6\text{m/s}$ (caso 7).	145
Figura 5.2.4.9 - Evolução vertical na chama da intensidade média da fluorescência de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 7.	145
Figura 5.2.4.10 - Fotografia direta da chama para o caso 9 com tempo de exposição de 1/1000 segundos.	146
Figura 5.2.4.11 - A primeira imagem é a média de 1000 imagens, o RMS e 4 imagens instantâneas da concentração de OH obtidas com PLIF para $U_j=2,19\text{m/s}$ e $U_a=11,7\text{m/s}$ (caso 9).	146
Figura 5.2.4.12 - Evolução vertical na chama da intensidade média de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 9.	147
Figura 5.2.4.13 - Fotografia direta da chama para o caso 10 com tempo de exposição de 1/1000 segundos.	147
Figura 5.2.4.14 - A primeira imagem é a média de 1000 imagens, o RMS e 4 imagens instantâneas da concentração de OH obtidas com PLIF para $U_j=2,92\text{m/s}$ e $U_a=11,7\text{m/s}$ (caso 10).	148
Figura 5.2.4.15 - Evolução vertical na chama da intensidade média de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 10.	148
Figura 5.2.4.16 - Fotografia direta da chama para o caso 11 com	

tempo de exposição de 1/1000 segundos.	149
Figura 5.2.4.17 - A primeira imagem é a média de 1000 imagens, o RMS e 4 imagens instantâneas da concentração de OH obtidas com PLIF para $U_j=6,9\text{m/s}$ e $U_a=11,7\text{m/s}$ (caso 11).	150
Figura 5.2.4.18 - Evolução vertical na chama da intensidade média de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 11.	150
Figura 5.2.5.1 - Fotografia direta da chama para o caso 8 com tempo de exposição de 1/1000 segundos.	151
Figura 5.2.5.2 - A primeira imagem é a média de 1000 imagens, o RMS e 4 imagens instantâneas da concentração de OH obtidas com PLIF para $U_j=6,9\text{m/s}$ e $U_a=6,6\text{m/s}$ (caso 8)	152
Figura 5.2.5.3 - Evolução vertical na chama da intensidade média de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 8	152
Figura 5.3.1.1 - Imagem média da intensidade de fluorescência do OH obtida no experimento (esquerda), e imagem da simulação para a concentração do OH (direita)	154
Figura 5.3.1.2 - Comparações das linhas horizontais traçadas na chama. Imagem média obtida do experimento (esquerda), simulação (direita)	154
Figura 5.3.1.3 - Velocidade longitudinal calculada na linha do centro do queimador	155
Figura 5.3.1.4 - Componente longitudinal da velocidade calculada na linha situada a $X=0,128\text{m}$ do centro do queimador	156
Figura 5.3.1.5 - Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade calculada para $Y=10$ e 60mm	157
Figura 5.3.2.1 - Imagem da simulação de concentração de OH (esquerda) e imagem média do experimento (direita) para a chama do caso 9, tipo I	158
Figura 5.3.2.2 - Comparações das linhas horizontais traçadas na chama para o caso 9. Imagem média obtida do experimento (esquerda), simulação (direita)	159

Figura 5.3.2.3 - Componente longitudinal da velocidade calculada ao longo da linha central do queimador para o caso 9	159
Figura 5.3.2.4 - Imagem média da intensidade de fluorescência do OH obtida no experimento (esquerda), e imagem da simulação para a concentração do OH (direita)	160
Figura 5.3.2.5 - Componente longitudinal da velocidade ao longo da linha central do queimador experimental para o caso 8 realizada via simulação numérica.	161
Figura 5.3.2.6 - Comparações das linhas horizontais traçadas na chama em ambos os casos para o caso 8. Imagem média obtida do experimento (esquerda), e da simulação (direita)	161

Lista de tabelas

Tabela 2.1.1 - Estudos de escoamentos turbulentos em queimadores tipo obstáculo.	28
Tabela 2.1.2 - Características dinâmicas dos tipos de chamas estudadas por Dally	36
Tabela 2.2.1 - Características das diferentes chamas estudadas por Masri	49
Tabela 3.1 - Características geométricas das malhas empregadas para modelar o experimento de Schefer	74
Tabela 3.2 - Características geométricas da malha empregada para modelar o queimador tipo obstáculo desenvolvido neste trabalho.	76
Tabela 3.3 - Valores para cada caso na lei de potência.	78
Tabela 3.4 - Valores das constantes para cada caso na lei de potência.	79
Tabela 4.1 - Estimativa dos regimes de operação do jato de combustível do GNV para caso de combustão estequiométrica	87
Tabela 5.1.1.1 - Principais características dos casos 1 e 2, escoamento inerte.	111
Tabela 5.1.1.2 - Descrição dos parâmetros empregados no caso 3, 4, 5, e 6 do escoamento inerte com diferentes modelos de turbulência.	115
Tabela 5.1.1.3 - Descrição dos parâmetros empregados no caso 7 e 8 do escoamento inerte com o modelo SST (Correa e Gulati [7])	118
Tabela 5.1.1.4 - Descrição dos parâmetros empregados no caso 9 e 10 do escoamento inerte com o modelo κ - ϵ (Correa e Gulati [7])	120
Tabela 5.1.1.5 - Descrição dos parâmetros empregados no	

caso 11, 12 e 13 do escoamento inerte com o modelo SST, (trabalho da Ansys)	122
Tabela 5.2.1.1 - Velocidades dos escoamentos de combustível e de ar para cada caso estudado.	128

Nomenclatura

Caracteres Latinos

OH – Radical Hidroxila.

D_j – Diâmetro do jato de combustível.

D_B – Diâmetro do ar anular.

U_j – Velocidade do jato de combustível.

U_a – Velocidade do ar anular.

D_k – Diâmetro do disco.

CH_4 – Metano.

CO – Monóxido de Carbono.

H_2O – Vapor de água.

O_2 – Oxigênio.

CH_3OH – Metanol.

%BO – razão velocidade do combustível e velocidade de extinção.

NO – Óxido Nítrico.

R_H – Razão entre velocidade do jato de combustível e do ar anular.

Re_j – Número de Reynolds do jato de combustível.

MgO – Óxido de magnésio.

Δh – Entalpia imperfeita.

h_0 – Entalpia do combustível.

h_f – Entalpia do ar.

h_t – Entalpia total específica.

h – Entalpia estática.

Z – Fração de mistura.

BR – Razão de obstrução, razão entre área do corpo rombudo e área do duto confinado.

\tilde{f} – Média da fração de mistura.

$f_{k,j}$ – Força volumétrica na direção j .

q_i – Fluxo de calor.

Y_k – Fração mássica da k -ésima espécie.

Pr_t – Número de Prandtl turbulento.

C_μ – Constante do modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$.

$F(M_t)$ – Função de compressibilidade.

$y +$ – Distância adimensional.

u_τ – Velocidade de fricção.

Δy – Distância da parede ao nó inicial.

F – Função de mistura.

\tilde{Y}_k – Medida de favre da fração de massa das espécies k .

Sc_{kt} – Número de Schmidt da k -ésima espécie.

Da – Número de Damköhler.

D – Coeficiente de difusão binário.

$P(Z, \chi)$ – PDF da fração de mistura e da taxa de dissipação.

$P(\chi)$ – PDF da taxa de dissipação da fração de mistura.

Δp – Queda de pressão.

f – Coeficiente de perda.

Sn – Estado excitado singleto

k_B – Constante de Boltzmann's

Caracteres Gregos

$\dot{\omega}_k$ – Taxa de reação da k -ésima espécie.

τ_{ij} – Tensor de tensões viscosas.

Γ_k – Coeficiente de difusão.

δ_{ij} – Delta de Kronecker.

μ_t – Viscosidade turbulenta.

κ – Energia cinética turbulenta.

ε – Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta.

ω – Taxa de dissipação específica ou transporte da vorticidade turbulenta.

τ_ω – Tensor cisalhante na parede.

Φ_i – Função de ponderação.

τ_{EBU} – Tempo turbulento para o EDM.

ν – Viscosidade cinemática.

ϕ – Campo escalar passivo.

ν – Número de moles de oxidante

Simbologia

Δ – Intervalo.

∂ – Derivada parcial.

$\bar{\phi}$ – Média do campo escalar.

ϕ' – Flutuação do campo escalar.

Σ – Somatória.

Abreviações

FSP – Ponto de estagnação anterior.

ASP – Ponto de estagnação posterior.

OVC – Centro do vórtice externo.

IVC – Centro do vórtice interno.

OSP – Ponto de estagnação fora do eixo de simetria.

PDF – Função Densidade de Probabilidade.

TVR – Taxa de viscosidade do turbilhão

CI – Cruzamento Interno.