

Pedro Rios de Moura Teixeira

**Simulação do Processo de Combustão de
Gases provenientes de Aterros Sanitários.**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Rio de Janeiro, Agosto de 2004



Pedro Rios de Moura Teixeira

**Simulação do Processo de Combustão de Gases
provenientes de Aterros Sanitários.**

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

Marcos Sebastião de Paula Gomes

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Mônica Feijó Nacache

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

André Augusto Isnard

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Luciano Basto Oliveira

Pesquisador – IVIG – COPPE/UFRJ

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de Agosto de 2004

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

Pedro Rios de Moura Teixeira

Graduou-se em Engenharia Mecânica na UFBA (Universidade Federal da Bahia) em 2000. Nos seis anos que antecederam ao seu ingresso no Programa de Pós-Graduação da PUC-Rio dedicou-se prioritariamente ao serviço da Igreja Católica como missionário na Comunidade Católica Shalom.

Ficha Catalográfica

Teixeira, Pedro Rios de Moura

Simulação do processo de combustão de gases provenientes de aterros sanitários / Pedro Rios de Moura Teixeira; orientador: Marcos Sebastião de Paula Gomes. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

144 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Combustão. 3. Biogás. 4. Simulação. 5. Formação de poluentes. 6. Energia. 7. Lixo. 8. Aterro sanitário. I. Gomes, Marcos Sebastião de Paula. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Para a minha Família, Fabiana, Malu, e,
para a Comunidade Católica Shalom.

Agradecimentos

A Deus por ser o sentido e o motivo principal deste trabalho em sua presença e fidelidade constantes.

Aos meus pais Vanete e Silvestre, a minha avó Aracy, aos meus irmãos Ducca e João, e, a minha noiva Fabiana pela confiança, amizade, compreensão, motivação e presença nesse tempo tão importante.

Ao meu orientador Marcos Sebastião de Paula Gomes pelo estímulo, paciência e parceria para realização deste trabalho.

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

Aos gerentes e funcionários do Parque Sócio Ambiental de Canabrava, na cidade de Salvador pelo acolhimento, atenção e colaboração na realização deste trabalho.

Aos professores e pesquisadores que participaram da banca examinadora.

Aos colegas estudantes e amigos da PUC-Rio.

A todos os professores e funcionários do Departamento, pelos ensinamentos e cooperação.

Aos irmãos e amigos da Comunidade Católica Shalom, especialmente, aos das Missões do Rio de Janeiro e Salvador pelo apoio, acolhimento, amizade, atenção e oração.

A todos Shalom!

Resumo

Teixeira, Pedro Rios de Moura; Gomes, Marcos Sebastião de Paula. **Simulação do processo de combustão de gases provenientes de aterros sanitários.** Rio de Janeiro, 2004, Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A utilização do biogás, proveniente de aterros sanitários, para a produção de energia elétrica mostra que os problemas ambientais consequentes dos resíduos sólidos podem ser revertidos em benefícios ambientais e econômicos. Este projeto apresenta resultados sobre a composição dos resíduos sólidos em aterros sanitários e investiga sua utilização como fonte de energia através do seu processo de combustão.

Foi estudado um modelo baseado na formulação de volumes finitos, através da utilização do código comercial Fluent (versão 6.2), que inclui o modelo k- ϵ de turbulência, o modelo generalizado de taxas finitas de Arrhenius e Magnunssen para o cálculo das reações químicas e o modelo de radiação por transferência discreta, para simular o processo de combustão em fornalhas industriais. O objetivo deste estudo é investigar a aplicação do modelo na simulação do processo de combustão do biogás, avaliar a possibilidade de uso do biogás como fonte de energia e prever a formação de poluentes, tais como NO, CO e SO₂.

Na simulação do processo de combustão foram utilizados modelos de uma única reação global (1 etapa) para a oxidação dos hidrocarbonetos e modelos de duas reações (2 etapas). Para a previsão da formação de NO investigou-se os mecanismos thermal NO, prompt NO, e fuel NO. Os resultados indicaram que o mecanismo fuel NO foi o mecanismo dominante no processo de formação do NO.

Os resultados encontrados indicam a possível aplicação do modelo na investigação do processo de combustão do biogás. De acordo com os níveis de temperatura e de fluxo encontrados avalia-se que o biogás pode ser uma alternativa importante como fonte de energia. Estudos experimentais, contudo, são necessários para um melhor aproveitamento do biogás.

Palavras-chave

Combustão; biogás; simulação; formação de poluentes; energia; lixo; aterro sanitário.

Abstract

Teixeira, Pedro Rios de Moura; Gomes, Marcos Sebastião de Paula. **Simulation of the combustion process of sanitary landfill gas.** Rio de Janeiro, 2004, Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The utilization of the sanitary landfill gas for electric power generation shows how the solid waste environmental problems can be reverted to environmental and economical benefits. This screen shows results about waste composition in sanitary landfills and investigates its utilization as energy source through biogas combustion.

A model based on finite volume formulation was studied, using the commercial code Fluent (version 6.2), which includes the template $k-\epsilon$ of turbulence, the finite rates generalized model of Arrhenius and Magnunssen for chemical reactions calculations, and, the discrete transfer radiation model to simulate the combustion process in industrial furnaces. The objective of this study is to investigate the application of this model to simulate the biogas combustion process, to evaluate the feasibility of using the biogas as energy source and to predict the formation of pollutants such as NO, CO and SO₂.

In the combustion process simulations, models using one global reaction (1 step), to the hydro carbonates oxidation, and models using two reactions (2 steps) were investigated. To estimate the NO formation, the thermal NO, prompt NO and fuel NO mechanisms have been investigated. The fuel NO mechanism prevails into this process.

Results show the possible application of the model studied for the biogas combustion process investigating. According to the temperature and flows levels found, it is possible to estimate that the biogas can be, as energy source, an important alternative. Experimental studies, however, are necessary to better use the biogas.

Keywords

Combustion; biogas; simulation; formation of pollutants; energy; waste; sanitary landfill.

Sumário

1. Introdução	22
1.1 Conceitos Gerais	22
1.2 Objetivo	26
1.3 Organização do Trabalho	26
2. Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – Aterros Sanitários	28
2.1 Conceitos Gerais	28
2.2 Geração de Gases em Aterros Sanitários	34
2.3 Composição e Aproveitamento do Gás de Aterros Sanitários	36
3. Modelagem Numérica	46
3.1 Conservação de Massa	48
3.2 Conservação da Quantidade de Movimento Linear	48
3.3 Conservação da Energia	51
3.4 Conservação de Espécies Químicas	55
3.5 Condições de Contorno e Regiões Próximas à Parede	70
4. Definição da Geometria, Malha e Parâmetros da Simulação	74
4.1 Fornalha experimental	74
4.2 Geometria e Malha para a Solução Numérica	75
4.3 Propriedades	76
4.4 Condições de Contorno e Parâmetros da Simulação	79
5. Descrição das Modelagens e apresentação dos Resultados	81
5.1 Modelagens utilizando Taxas Finitas Generalizadas	82
5.2 Modelagens utilizando Fração de Mistura (formulação PDF)	104
5.3 Estudo de Emissões das Espécies Químicas	112
6. Conclusão	121

7. Referências Bibliográficas	125
8. Apêndice A – Teste de Malha	129
9. Apêndice B – Solução das Equações	137
B.1 Método de Volumes Finitos	137
B.2 Solução Exata	138
B.3 Discretização	139
B.4 Esquema Power Law	141
B.5 Acoplamento Pressão Velocidade	141

Lista de figuras

Figura 2.1 – Disposição dos Resíduos no Brasil	32
Figura 2.2 – Fluxograma das rotas de destinação dos resíduos sólidos	32
Figura 2.3 – Composição percentual média do lixo no Brasil, em peso	34
Figura 2.4 – Esquema dos principais impactos ambientais resultantes da disposição de resíduos em aterros	35
Figura 2.5 – Distribuição Global das Fontes de Metano	37
Figura 2.6 – Esquema de captação e geração de energia elétrica a partir do gás do lixo	38
Figura 2.7 – Aterro Bandeirantes – Foto aérea	40
Figura 2.8 – Aterro Bandeirantes – Moto-geradores	41
Figura 2.9 – Parque Sócio Ambiental de Canabrava - Unidades de Compostagem, Triagem de Reciclados e Áreas de Lazer	42
Figura 2.10 – Parque Sócio Ambiental de Canabrava - Dutos de Entrada do Gás, Válvulas de Entrada e Gerador	43
Figura 3.1 – Ângulo sólido hemisférico em torno do ponto p função de θ e ϕ	54
Figura 3.2 – Modelo simplificado de formação do fuel NOx	65
Figura 4.1 – Geometria da fornalha experimental de Garreton (1994)	74
Figura 4.2 – Geometria da Fornalha Cilíndrica utilizada na simulação	75
Figura 4.3 – Malha Utilizada na simulação - Visão total	75
Figura 4.4 – Malha Utilizada na simulação - Regiões de Entrada e Saída	76
Figura 4.5 – Malha Utilizada na simulação – Região Central	76
Figura 5.1 – Função de Corrente, em kg/s, para o processo de combustão em uma etapa, no interior da fornalha cilíndrica adiabática (modelagem 01)	83

Figura 5.2 - Distribuição das temperaturas (K), para o processo de combustão em uma etapa no interior da fornalha cilíndrica adiabática (modelagem 01)	83
Figura 5.3 - Distribuição de temperaturas (K), referente à modelagem 01, para $r=0\text{m}$ (eixo de simetria), $r=0,037\text{m}$ e $r=0,128\text{m}$	84
Figura 5.4 - Concentração do NO (em fração molar), para o processo de combustão em uma etapa no interior da fornalha cilíndrica adiabática (modelagem 01)	84
Figura 5.5 - Concentração (em fração molar) do NO, para a modelagem 01, em $r=0\text{m}$ (eixo de simetria) e em $r=0,128\text{m}$	85
Figura 5.6 - Distribuição das temperaturas (K), para o processo em uma etapa no interior da fornalha cilíndrica não adiabática (modelagem 02)	85
Figura 5.7 - Distribuição de temperaturas (K), referente à modelagem 02, para $r=0\text{m}$ (simetria), $r=0,037\text{m}$ e para $r=0,128\text{m}$	86
Figura 5.8 - Concentração do NO (em fração molar), para o processo em uma etapa no interior da fornalha cilíndrica não adiabática (modelagem 02)	86
Figura 5.9 - Concentração, fração molar, do NO, referente à modelagem 02, para $r=0$ (simetria) e para $r=0,128\text{m}$	87
Figura 5.10 - Concentrações, em fração molar, de SO_2 , O_2 , CO_2 e H_2O , referentes à modelagem 02, no interior da fornalha cilíndrica	87
Figura 5.11 - Concentrações, em fração molar, de SO_2 , O_2 , CO_2 e H_2O , referentes à modelagem 02	88
Figura 5.12 - Concentrações, em fração molar, de CH_4 e do H_2S , referentes à modelagem 02, no interior da fornalha cilíndrica	89
Figura 5.13 - Concentrações, em fração molar, de CH_4 e do H_2S , referentes à modelagem 02, ao longo do eixo de simetria.	89
Figura 5.14 - Concentrações, em fração molar, de C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} e C_5H_{12} , referentes à modelagem 02, ao longo do eixo de simetria	90
Figura 5.15 - Distribuição das temperaturas, para a modelagem 03, no interior da fornalha cilíndrica	91

Figura 5.16 - Distribuição de temperaturas, referente à modelagem 03, para $r = 0$ (simetria), $r = 0,037\text{m}$ e para $r = 0,128\text{m}$, (gráfico à esquerda). Gráfico comparativo das temperaturas ao longo do eixo de simetria entre os processos adiabáticos em uma etapa (modelagem 01) e em duas etapas (modelagem 03), gráfico à direita	91
Figura 5.17 - Concentração do NO e CO (em fração molar), para a modelagem 03, no interior da fornalha cilíndrica	92
Figura 5.18 - Concentrações (em fração molar) do NO e do CO, referentes à modelagem 03, para $r = 0$ (simetria) e para $r = 0,128\text{m}$	92
Figura 5.19 - Distribuição das temperaturas (K), para o processo de combustão em duas etapas no interior da fornalha cilíndrica não adiabática (Modelagem 04)	93
Figura 5.20 - Distribuição de temperaturas, referente à modelagem 04, para $r = 0$ (simetria), $r = 0,037\text{m}$ e para $r = 0,128\text{m}$, (gráfico à esquerda). Gráfico comparativo das temperaturas ao longo do eixo de simetria entre os processos não adiabáticos em uma etapa (modelagem 02) e em duas etapas (modelagem 04), à direita	93
Figura 5.21 - Concentração do NO e CO (em fração molar), para a modelagem 04, no interior da fornalha cilíndrica	94
Figura 5.22 - Concentrações (em fração molar) do NO e do CO, referentes à modelagem 04, para $r = 0$ (simetria) e para $r = 0,128\text{m}$	94
Figura 5.23 - Concentrações, em fração molar, de SO_2 , O_2 , CO_2 e H_2O , referentes à modelagem 04, no interior da fornalha cilíndrica	95
Figura 5.24 - Concentrações, em fração molar, de SO_2 , O_2 , CO_2 e H_2O , referentes à modelagem 04, ao longo do eixo de simetria	96
Figura 5.25 - Concentrações, em fração molar, de CH_4 , e H_2S , referentes à modelagem 04, no interior da fornalha cilíndrica	97
Figura 5.26 - Concentrações, em fração molar, de CH_4 e H_2S , referentes à modelagem 04, para $r = 0\text{m}$ (simetria)	97
Figura 5.27 - Concentrações, em fração molar, de C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} e C_5H_{12} , referentes à modelagem 04, para $r = 0\text{m}$ (simetria)	98
Figura 5.28 - Concentrações, em fração molar, de NO, para os diferentes mecanismos de formação do NO, no interior da fornalha	98

Figura 5.29 - Gráfico comparativo dos mecanismos de formação de NO. Gráfico à direita é o detalhe do gráfico à esquerda	99
Figura 5.30 - Distribuição das temperaturas (K), para a modelagem 05, no interior da fornalha cilíndrica	100
Figura 5.31 - Distribuição de temperaturas (K), referente à modelagem 07, para $r=0$ (simetria), $r=0,037$ e para $r=0,128\text{m}$	100
Figura 5.32 - Concentração do NO e CO (em fração molar), para a modelagem 05, no interior da fornalha cilíndrica	101
Figura 5.33 - Concentrações (em fração molar) do NO e do CO, referentes à modelagem 05, para $r=0$ (simetria) e para $r=0,128\text{m}$	101
Figura 5.34 - Concentrações, em fração molar, de SO_2 , O_2 , CO_2 e H_2O , referentes à modelagem 05, no interior da fornalha cilíndrica	102
Figura 5.35 - Concentrações, em fração molar, de SO_2 , O_2 , CO_2 e H_2O , referentes à modelagem 05, ao longo do eixo de simetria	102
Figura 5.36 - Concentrações, em fração molar, de CH_4 e H_2S , referentes à modelagem 05, ao longo do eixo de simetria	103
Figura 5.37 - Concentrações, em fração molar, de CH_4 e H_2S , referentes à modelagem 05, ao longo do eixo de simetria	103
Figura 5.38 - Concentrações, em fração molar, de C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} e C_5H_{12} , referentes à modelagem 05, para $r=0$ (simetria)	104
Figura 5.39 - Distribuição das temperaturas, para a modelagem 06, no interior da fornalha cilíndrica	105
Figura 5.40 - Distribuição de temperaturas, referente à modelagem 06, para $r=0$ (simetria), $r=0,037\text{m}$ e para $r=0,128\text{m}$ (gráfico à esquerda). Gráfico comparativo dos perfis de temperatura entre os modelos de taxas finitas (modelagem 03) e o modelo de fração de mistura (modelagem 06) para uma fornalha adiabática	105
Figura 5.41 - Concentração do NO e CO (em fração molar), para a modelagem 06, no interior da fornalha cilíndrica	106
Figura 5.42 - Concentrações (em fração molar) do NO e do CO, referentes à modelagem 06, para $r=0$ (simetria) e para $r=0,128\text{m}$	106

Figura 5.43 - Concentrações (em fração molar) do NO, referentes aos mecanismos thermal NO e prompt NO, utilizando o modelo de taxas finitas, no interior de uma fornalha adiabática (à esquerda), e não adiabática (à direita)	107
Figura 5.44 - Distribuição das temperaturas (K), para a modelagem 07, no interior da fornalha cilíndrica	107
Figura 5.45 - Distribuição de temperaturas (K), referente à modelagem 7, para $r=0$ (simetria), $r=0,037\text{m}$ e para $r=0,128\text{m}$ (gráfico à esquerda). Gráfico comparativo dos perfis de temperatura, ao longo do eixo de simetria, referentes às modelagens 04 (modelo de taxas finitas em duas etapas) e 07 (modelo de fração de mistura)	108
Figura 5.46 - Concentração do NO e CO (em fração molar), para a modelagem 07, no interior da fornalha cilíndrica	108
Figura 5.47 - Concentrações (em fração molar) do NO e do CO, referentes à modelagem 07, para $r=0$ (simetria) e para $r=0,128\text{m}$	109
Figura 5.48 - Concentrações, em fração molar, de SO_2 , O_2 , CO_2 e H_2O , referentes à modelagem 07, no interior da fornalha cilíndrica	109
Figura 5.49 - Concentrações, em fração molar, de SO_2 , O_2 , CO_2 e H_2O , referentes à modelagem 07, ao longo do eixo de simetria	110
Figura 5.50 - Concentrações, em fração molar, de CH_4 e H_2S , referentes à modelagem 07, no interior da fornalha cilíndrica	111
Figura 5.51 - Concentrações, em fração molar, de CH_4 e H_2S , referentes à modelagem 07, ao longo do eixo de simetria ($r=0\text{m}$) da fornalha cilíndrica	111
Figura 5.52 - Concentrações, em fração molar, de C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} e C_5H_{12} , referentes à modelagem 07, para $r=0\text{m}$ (simetria)	112
Figura 5.53 - Perfil das concentrações de O_2 , em fração molar, na saída da fornalha para as modelagens 02, 04, 05 e 07	112
Figura 5.54 - Concentrações, em fração molar, de O_2 na saída da fornalha para as modelagens 02, 04, 05 e 07	113
Figura 5.55 – Perfil das concentrações, em fração molar, de CH_4 , na saída da fornalha para as modelagens 02, 04, 05 e 07	113

Figura 5.56 - Concentrações, em fração molar, de CH ₄ , na saída da fornalha para as modelagens 02, 04, 05 e 07	114
Figura 5.57 - Perfis das concentrações, em fração molar, de H ₂ S, na saída da fornalha para as modelagens 02, 04, 05 e 07	114
Figura 5.58 - Concentrações, em fração molar, de H ₂ S, na saída da fornalha para as modelagens 02, 04, 05 e 07	115
Figura 5.59 - Perfis das concentrações, em fração molar, de SO ₂ , na saída da fornalha para as modelagens 02, 04, 05 e 07	115
Figura 5.60 - Concentrações, em fração molar, de SO ₂ , na saída da fornalha para as modelagens 02, 04, 05 e 07.	116
Figura 5.61 - Perfis das concentrações, em fração molar, de CO ₂ , na saída da fornalha para as modelagens 02, 04, 05 e 07	116
Figura 5.62 - Concentrações, em fração molar, de CO ₂ , na saída da fornalha para as modelagens 02, 04, 05 e 07	117
Figura 5.63 - Perfis das concentrações, em fração molar, de CO, na saída da fornalha para as modelagens 02, 04, 05 e 07	117
Figura 5.64 - Concentrações, em fração molar, de CO, na saída da fornalha para as modelagens 02, 04, 05 e 07	118
Figura 5.65 – Perfis das concentrações, em fração molar, de NO, na saída da fornalha para as modelagens 02, 04, 05 e 07	118
Figura 5.66 - Concentrações, em fração molar, de NO, na saída da fornalha para as modelagens 02, 04, 05 e 07	119
Figura A.1 - Perfis de função de corrente (R= 0.128m)	129
Figura A.2 - Perfis de função de corrente (x= 0.38m)	130
Figura A.3 - Perfis de velocidade (R= 0.128m) para as malhas 03 e 04.	130
Figura A.4 - Perfis de velocidade (x= 0.38m) para as malhas 03 e 04	131
Figura A.5 - Perfis de concentração de CO ₂ (R= 0.128m) para as malhas 03 e 04	131
Figura A.6 - Perfis de concentração de CO ₂ (R= 0) para as malhas 03 e 04	132

Figura A.7 - Perfis de concentração de CO ₂ (R= 0,25m) para as malhas 03 e 04	132
Figura A.8 - Perfis de concentração de CO ₂ (x= 1.7) para as malhas 03 e 04	132
Figura A.9 - Perfis de concentração de NO (R= 0m) para as malhas 03 e 04	133
Figura A.10 - Perfis de concentração de NO (R= 0,128) para as malhas 03 e 04	133
Figura A.11 - Perfis de concentração de NO (x= 0,25) para as malhas 03 e 04	134
Figura A.12 - Perfis de concentração de NO _x (x= 1,7 m) para as malhas 03 e 04	134
Figura A.13 - Perfis de temperatura (R= 0 m) para as malhas 03 e 04.	135
Figura A.14 - Perfis de temperatura (R= 0,128 m) para as malhas 03 e 04	135
Figura A.15 - Perfis de temperatura (x= 1,7 m) para as malhas 03 e 04.	135
Figura A.16 - Perfis de temperatura (x= 0,25 m) para as malhas 03 e 04.	136

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Classificação dos Resíduos Sólidos segundo a sua origem	28
Tabela 2.2 – Classificação dos Resíduos Sólidos segundo as suas características físicas	29
Tabela 2.3 – Exemplos básicos de cada categoria de resíduos sólidos urbanos	30
Tabela 2.4 – Quantidade de Resíduos e Taxa de produção dos gases em aterros sanitários	36
Tabela 2.5 – Composição dos gases do aterro sanitário de Mountain View, Califórnia, EUA	36
Tabela 2.6 – Composição dos gases gerados no Parque Sócio Ambiental de Canabrava, Salvador, Bahia, Brasil	43
Tabela 2.7 – Composição do gás produzido no aterro sanitário em Montreal e suas emissões após o processo de combustão	44
Tabela 2.8 – Emissões após o processo de combustão do gás produzido no aterro de Montreal, de acordo com balanço de massa	45
Tabela 3.1 – Constantes de velocidades das reações 3.38, 3.39 e 3.40	60
Tabela 4.1 – Componentes individuais do Calor Específico (principais espécies)	77
Tabela 4.2 – Composição dos jatos de biogás e ar na entrada do combustor	80
Tabela 5.1 – Relação das simulações realizadas	81
Tabela 5.2 – Espécies Químicas envolvidas no processo de combustão simulado	81
Tabela 5.3 – Reações globais para o processo de combustão em 1 etapa	82
Tabela 5.4 – Reações globais para o processo de combustão em 2 etapas	90

Tabela 5.5 – Composição do gás resultante do processo de combustão simulado (modelo de taxas finitas em duas etapas – modelagem 04)	120
Tabela A.1 – Dimensões das malhas computacionais utilizadas	129

Lista de símbolos

- A* Fator Pré-exponencial
- C* Concentração Molar (kmol/m³)
- C_μ* Coeficiente de Viscosidade Turbulenta
- D* Coeficiente de Difusão de Massa (m²/s)
- E* Energia de Ativação (J/kmol)
- I* Intensidade de Radiação (W/m²)
- K* Constante de Equilíbrio
- M* Massa Molecular (kg/kmol)
- P* Pressão total Modificada (N/m²)
- Pr* Número de Prandtl
- R* Velocidade de Radiação (kg.m³.s); Constante Universal dos Gases (J/mol.K)
- S* Velocidade de Reação (kmol/m³.s)
- Sc* Número de Schmidt
- T* Temperatura (K)
- U* Velocidade Média (m/s)
- a* Coeficiente de Absorção (1/m); Ordem da Reação de Oxigênio
- c_p* Calor Específico à Pressão Constante (j/kg.K)
- f* Fator de Correção
- g* Aceleração Gravitacional (m/s²)
- h* Entalpia por Unidade de Massa (J/kg)
- k* Energia Cinética Turbulenta; Condutividade Térmica; Constante de Velocidade.
- m* Fração de Massa
- p* Pressão (N/m²)
- u* Vetor Velocidade (m/s)

x Fração Molar

Símbolos Gregos

β Expoente de Temperatura

ε Taxa de Dissipação de Energia Cinética Turbulenta; Emissividade Total

γ Expoente de Concentração

κ Constante de Von Karman

η Coeficiente Estequiométrico

μ Viscosidade Absoluta (kg/m.s)

ρ Massa Específica (kg/m³)

σ Constante de Stefan Boltzmann (W/m²K⁴); Número de Prandtl; Variância

ϕ Razão de Equivalência; Quantidade Escalar

Γ Função Gamma

Subscritos

ef Viscosidade Efetiva

i, l Espécies

j Espécies Reagentes

k Reação; Energia Cinética Turbulenta

p Espécies Produtos

t Viscosidade Turbulenta; Número de Prandtl e Schmidt

*“No início era o Verbo,
e o Verbo estava voltado para Deus,
e o Verbo era Deus.
Ele estava voltado para Deus.
Tudo foi feito por meio dele;
e sem Ele nada se fez do que foi feito.”
(Jo 1,1-3)*