

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

Juan Carlos Guerrero Ordoñez.

Modelagem da Combustão de Biomassa em Leito Utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de concentração: Exploração do uso racional de recursos naturais e energia.

Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora.
Co-Orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini.

**Maio de 2015
Itajubá**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

Juan Carlos Guerrero Ordoñez.

**Modelagem da Combustão de Biomassa em Leito Utilizando a Dinâmica
dos Fluidos Computacional (CFD).**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 16 de junho
de 2015, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências
em Engenharia de Energia.**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora (**Orientador**)
Prof. Dr. Osvaldo José Venturini (**Co-Orientador**)
Prof. Dr. Lourival Jorge Mendes Neto
Prof. Dr. Rubenildo Vieira Andrade

**Maiο de 2015
Itajubá**



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Título da Dissertação: "Modelagem da Combustão de Biomassa em Leito Fixo, utilizando a Dinâmica de Flúido Computacional (CFD)"

Autor: **Juan Carlos Guerrero Ordoñez**

JULGAMENTO

| Examinadores | Conceito | Rubrica |
|--------------|---|---------|
| | A = Aprovado - R = Reprovado - I = Insuficiente | |
| 1º | A | |
| 2º | A | |
| 3º | A | |
| 4º | A | |

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- (2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- (3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.

Este documento terá a validade de 60 (sessenta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Final: Conceito: A, ou seja, aprovado

Observações: _____

Itajubá, 16 de junho de 2015.

Prof. Dr. Lourival Jorge Mendes Neto
1º Examinador – UFSJ

Prof. Dr. Rubenildo Vieira Andrade
2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Osvaldo José Venturini
3º Examinador (Co-Orientador) – UNIFEI

Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora
4º Examinador (Orientador) – UNIFEI

Agradecimentos

À minha família, pelo estímulo, apoio e confiança, a minha mãe Carmenza, ao meu pai Eduardo, e irmão Daniel.

Ao meu Orientador, ao professor e amigo Electo Eduardo Silva Lora por todo o conhecimento transmitido.

Aos professores Osvaldo Venturini, Arnaldo, Vladimir e em especial a Lourival pela orientação e amizade, e todos os professores do mestrado.

À toda equipe do Nest, pela colaboração e apoio.

A todos meus amigos da Republica Cativerio, pela paz e irmandade.

À família de Itajubá Rugby, por me ensinar o que é o rugby, pela irmandade e o terceiro tempo depois do jogo.

A Universidade Federal de Itajubá, e a esta cidade, aos quais muito devo.

Aos Colombianos morando em Itajubá, em especial Aline, por sua grande ajuda, jamais esquecerei.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

GUERRERO, J. C. (2015), *Modelagem da combustão de biomassa em leito fixo utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)*. 100p Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia - Universidade Federal de Itajubá).

O objetivo deste trabalho é desenvolver a modelagem dos processos da combustão de biomassa em leito utilizando CFD, determinando as variáveis fluidodinâmicas e cinéticas dos processos, que permita diminuir as perdas por combustão incompleta numa caldeira de pequena capacidade de geração de vapor. Para a modelagem apresentado neste trabalho foi usada a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) como ferramenta numérica para solucionar os modelos dos processos da combustão e assim propor melhorias que permitiram aumentar a eficiência nos processos da combustão. O software utilizado foi o Fluent ANSYS V14. A caldeira modelada se encontra no laboratório do NEST da Universidade Federal de Itajubá. Além disso, foi proposta uma metodologia para desenvolvimento da combustão de qualquer tipo de biomassa que fosse queimada em leito fixo. A modelagem permitiu aumentar a eficiência na combustão da caldeira e comparar cenários de operação.

PALAVRAS CHAVES: Combustão de biomassa, Dinâmica de Fluidos Computacional CFD, Modelagem, Leito fixo.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Objetivos | 3 |
| 1.1.1 Objetivo geral..... | 3 |
| 1.1.2 Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.2 Justificativa | 4 |
| 1.3 Estrutura do trabalho | 7 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA | 8 |
| 2.1 Oferta e demanda energética: Energias Renováveis | 8 |
| 2.2 Generalidades da biomassa | 9 |
| 2.2.1 Aproveitamento da biomassa | 10 |
| 2.2.2 Caracterização físico química da biomassa..... | 11 |
| 2.3 Caldeiras..... | 13 |
| 2.3.1 Queima em grelha | 15 |
| 2.3.2 Eficiência de caldeiras..... | 15 |
| 2.4 Processo da Combustão..... | 18 |
| 2.4.1 Combustão de madeira..... | 19 |
| 2.5 Métodos Numéricos: Dinâmica Computacional de Fluidos (CFD) | 20 |
| 2.6 Modelagem com CFD da Combustão de Biomassa em Leito..... | 22 |
| 2.6.1 Modelagem da combustão no leito de biomassa | 24 |
| 2.6.2 Modelação da combustão na fase gasosa | 25 |
| 3. MODELAGEM MATEMÁTICA DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA EM LEITO | 28 |
| 3.1 Métodos de Volumes Finitos MVF..... | 28 |
| 3.1.1 Discretização das equações de Navier-Stokes..... | 28 |
| 3.1.2 Acoplamento Pressão – Velocidade | 29 |
| 3.1.3 Erros dos métodos matemáticos | 30 |
| 3.2 Modelo de Dinâmica dos Fluidos..... | 31 |
| 3.2.1 Equação da conservação de continuidade | 31 |
| 3.2.2 Equação da conservação de quantidade de movimento | 31 |
| 3.2.3 Equação da conservação da energia | 32 |
| 3.3 Modelos para escoamentos turbulentos..... | 34 |
| 3.3.1 Escoamentos turbulentos..... | 34 |
| 3.3.2 Lei da parede | 35 |
| 3.3.3 Cálculo do y^+ | 36 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.3.4 | Modelos de Turbulência..... | 37 |
| 3.4 | Modelo de Meio Poroso | 39 |
| 3.5 | Modelo de Transporte de Espécies e Reações Químicas. | 41 |
| 3.5.1 | Equação de transporte de espécies | 41 |
| 3.5.2 | Taxa de produção das espécies devido à reação química..... | 42 |
| 3.5.3 | Modelo Eddy-dissipation | 43 |
| 3.6 | Modelo de radiação | 44 |
| 3.6.1 | Equação de transferência radiativa..... | 44 |
| 3.6.2 | Modelo Discrete Ordinates (DO) | 45 |
| 4. | METODOLOGIA DA MODELAGEM COM CFD DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA EM LEITO PARA PEQUENHAS CALDEIRAS | 46 |
| 4.1 | Caraterização da Biomassa..... | 47 |
| 4.2 | Caraterização da Caldeira..... | 48 |
| 4.3 | Caraterização do Leito de Combustível: Meio Poroso..... | 51 |
| 4.4 | Combustão do Leito de Biomassa | 52 |
| 4.4.1 | Termo fonte das espécies | 52 |
| 4.4.2 | Termo fonte de energia | 53 |
| 4.4.3 | Submodelos da combustão da madeira em leito fixo | 54 |
| 4.5 | Aplicativa da Dinâmica dos Fluidos Computacional CFD na combustão de madeira..... | 55 |
| 5. | MODELAGEM COM CFD DA COMBUSTÃO DE MADEIRA EM LEITO | 57 |
| 5.1 | Considerações e Simplificações da Modelagem. | 58 |
| 5.2 | Geometria da Modelagem | 59 |
| 5.3 | Desenho da Malha..... | 60 |
| 5.3.1 | Cálculo de y^+ | 63 |
| 5.4 | Condições Iniciais da Modelagem da Combustão | 63 |
| 5.4.1 | Caracterização da Madeira. | 64 |
| 5.4.2 | Caracterização do Leito de Madeira como Meio Poroso. | 64 |
| 5.4.3 | Termos Fontes das Espécies da Combustão..... | 65 |
| 5.5 | Planos de Análise dos Resultados | 65 |
| 5.6 | Cenário 1: Modelagem da Combustão de Madeira em Leito com 100 % de Ar Primário.... | 68 |
| 5.6.1 | Variáveis de Entrada para o Cenário 1 | 68 |
| 5.6.2 | Perfil de Temperaturas | 69 |
| 5.6.3 | Perfil de Velocidades | 71 |
| 5.6.4 | Linhas de Corrente | 72 |
| 5.6.5 | Fração Molar de Voláteis | 75 |
| 5.6.6 | Fração Molar de Oxigênio..... | 75 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5.6.7 | Fração molar de CO | 78 |
| 5.6.8 | Fração molar de CO ₂ | 78 |
| 5.7 | Cenário 2: Modelagem da Combustão de Madeira em Camada, com Ar primário (40%) e Ar secundário (60%). | 81 |
| 5.7.1 | Variáveis de Entrada para o Cenário 2 | 81 |
| 5.7.2 | Perfil de Temperaturas | 82 |
| 5.7.3 | Perfil de Velocidades | 82 |
| 5.7.4 | Linhas de Corrente | 85 |
| 5.7.5 | Fração Molar das Espécies: Voláteis, O ₂ , CO e CO ₂ | 85 |
| 5.7.6 | Comportamento das Principais Variáveis da Combustão Através da Camada de Madeira | 88 |
| 5.8 | Comparativa dos Cenários 1 e 2 | 89 |
| 5.8.1 | Eficiência da Fornalha | 89 |
| 6. | CONCLUSÕES | 91 |
| 6.1 | Recomendações para trabalhos futuros | 92 |
| | REFERÊNCIAS | 93 |
| | ANEXO 1: Equipamentos do laboratório do NEST | 97 |
| | ANEXO 2: Planos da geometria da caldeira | 98 |
| | ANEXO 3: Cálculo do meio poroso | 99 |
| | ANEXO 4: Combustão estequiométrica | 100 |
| | ANEXO 5: Resultados nas linhas de análise | 101 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Tendência esperada da demanda energética mundial até 2050. [2]..... | 4 |
| Figura 1.2. Mapa da população nos estados do Brasil no 2010. [3]..... | 5 |
| Figura 1.3 Produção da madeira a partir do extrativismo no Brasil. [4] | 6 |
| Figura 2.1 Estimativa da energia consumida no mundo. [6]..... | 8 |
| Figura 2.2 Oferta interna de energia no Brasil no ano de referência 2014. [7] | 9 |
| Figura 2.3 Cadeia de suprimento da biomassa. [10] | 11 |
| Figura 2.4 Esquema de uma caldeira industrial. [20]..... | 14 |
| Figura 2.5 Diagrama de Sankey da eficiência da caldeira com o método indireto. | 17 |
| Figura 2.6 Modelo da combustão de biomassa representada como uma partícula esférica [23]..... | 19 |
| Figura 2.7. Etapas da combustão da madeira [25]. | 20 |
| Figura 2.8 Discretização das variáveis. [28] | 21 |
| Figura 2.9. Esquema da modelagem da combustão de biomassa em grelha, usando CFD [30]. | 23 |
| Figura 3.1. Fluxograma dos métodos de solução do solver baseado na pressão. a) algoritmo segregado, b) algoritmo acoplado. [Fonte adaptada: 39]..... | 30 |
| Figura 3.2. Equações de governo [28]..... | 31 |
| Figura 3.3. Representação esquemática da decomposição de Reynolds. [41] | 34 |
| Figura 3.4. Perfil de velocidades na camada limite no escoamento perto das paredes usando variáveis adimensionais y^+u^+ . [41] | 35 |
| Figura 4.1 Diagrama de fluxo da metodologia da modelagem da combustão de biomassa em leito fixo com os métodos de volumes finitos, usando CFD. | 47 |
| Figura 4.2. Madeira pré-tratada na caldeira de estudo no laboratório do NEST..... | 48 |
| Figura 4.3. Esquema da caldeira de testes do NEST..... | 49 |
| Figura 4.4. Fotos da fornalha da caldeira de estudo..... | 50 |
| Figura 4.5. Medição da vazão do ar primário na fornalha com um anemômetro..... | 51 |
| Figura 4.6 Esquema da secagem de madeira na modelagem | 54 |
| Figura 4.7 Esquema da liberação de voláteis na modelagem..... | 54 |
| Figura 4.8 Esquema da queima do char na modelagem..... | 55 |
| Figura 4.9 Esquema global da estratégia de combustão para a modelagem. | 55 |
| Figura 5.1 Fluxograma da modelagem da combustão de madeira em uma caldeira de grelha fixa usando CFD..... | 58 |
| Figura 5.2. Estrutura da geometria da caldeira..... | 60 |
| Figura 5.3 Desenho da malha para a geometria do estudo. | 62 |
| Figura 5.4 Avaliação da malha: Qualidade dos elementos da malha. | 62 |
| Figura 5.5 Contorno do Y^+ nas paredes da fornalha. | 63 |
| Figura 5.6 Comprimento característico da caldeira do estudo. | 66 |
| Figura 5.7. Planos de análise dentro da fornalha de estudo. | 67 |
| Figura 5.8. Perfil de Temperatura na Fornalha. | 70 |
| Figura 5.9 Perfil de temperaturas na saída dos gases da fornalha. | 71 |
| Figura 5.10. Perfil de velocidades na fornalha..... | 73 |
| Figura 5.11. Linhas de corrente com relação à velocidade dos gases dentro da fornalha. | 74 |
| Figura 5.12. Fração molar de voláteis na fornalha. | 76 |
| Figura 5.13. Fração molar de oxigênio na fornalha. | 77 |
| Figura 5.14. Fração molar de CO na fornalha..... | 79 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.15. Fração molar de CO ₂ na fornalha..... | 80 |
| Figura 5.16. Perfil de temperatura, modelagem no Cenário 2: 40% ar primário e 60% ar secundário. | 83 |
| Figura 5.17. Perfil de velocidades, no cenário 2. | 84 |
| Figura 5.18. Linhas de corrente no cenário 2. | 86 |
| Figura 5.19. Fração molar das espécies: voláteis, O ₂ , CO e CO ₂ no Cenário 2. | 87 |
| Figura 5.20. Linhas de análise dos resultados. | 88 |
| Figura 5.21. Resultados das variáveis da combustão na Linha 3-Y no Cenário 2. | 88 |
| Figura 5.22. Plano de análise dos resultados obtidos com a modelagem nos cenários 1 e 2. | 89 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1. Métodos analíticos normalizados para determinação das propriedades físicas e química de biomassa. [17,20] | 12 |
| Tabela 2.2. Poder calorífico de diferentes tipos de biomassa, com umidade de 20 % [18]. | 13 |
| Tabela 2.3 Classificação de caldeiras por sua capacidade de produção de energia [19]. | 14 |
| Tabela 2.4. Métodos para o cálculo da eficiência nas caldeiras. | 16 |
| Tabela 2.5. Principais reações da biomassa no processo de combustão de madeira [26]. | 20 |
| Tabela 2.6. Recompilação de trabalhos com os modelos selecionados para a combustão de biomassa em leito. | 27 |
| Tabela 3.1 Vantagens e limitações dos Modelos de radiação [39]. | 45 |
| Tabela 4.1 Características de projeto da caldeira subministrados pela AG-Therm. | 49 |
| Tabela 4.2 Dados cinéticos e térmicos dos sub - processos da combustão. | 53 |
| Tabela 5.1 Condições Iniciais da Modelagem da Combustão de Biomassa em Camada. | 59 |
| Tabela 5.2 Relação entre Reynolds e a dimensão do volume criado (y_p) para um $y^+ < 100$ | 61 |
| Tabela 5.3 Valores meios de análise elementar, análise imediata e Poder Calorífico da madeira picada. | 64 |
| Tabela 5.4 Caracterização do leito de madeira como meio poroso. | 64 |
| Tabela 5.5 Termos fontes de espécies e de energia para cada subprocesso da combustão da madeira. | 65 |
| Tabela 5.6 Condições de Entrada da Modelagem no Cenário 1: 100 % ar primário. | 68 |
| Tabela 5.7 Resultados da temperatura média calculada com a modelagem e obtida do trabalho de [53]. | 71 |
| Tabela 5.8 Condições de Entrada da Modelagem no Cenário 2: 40 % ar primário e 60% ar secundário. | 81 |
| Tabela 5.9. Resultados da modelagem para o cenário 1 e 2. | 90 |

1. INTRODUÇÃO

Na antiguidade, a humanidade conheceu a *energia* representada como o fogo, produzida pelos raios que caíam nas árvores. Este acontecimento começou a gerar perguntas e interesse. Posteriormente o fogo foi utilizado para abastecer necessidades de sobrevivência, como o fornecimento do calor, fabricação de ferramentas de caça e preparação da comida. Em seguida, os desenvolvimentos tecnológicos e a centralização das populações na revolução industrial trouxeram como consequência do crescimento na demanda energética e nos impactos ambientais, que continuam até o presente.

Atualmente pelo crescimento exponencial da população, ligado à falta da consciência ambiental pela humanidade, como o desbordante consumo pelo petróleo e pelos equipamentos tecnológicos elétricos, são as causas dos impactos ambientais que se manifestam atualmente como: o aumento da geração dos resíduos sólidos, emissões de poluentes na atmosfera, água e solo e provocam a liberação dos gases de efeito estufa e o aquecimento global, além disso os gradientes altos da temperatura na atmosfera produz furacões e o aumento da temperatura provoca a extinção de algumas espécies do nosso planeta.

No setor acadêmico, as pesquisas atuais em sistemas de conversão da energia, como os geradores de vapor, estão encaminhadas para suprir as necessidades energéticas das populações, diminuir impactos ambientais, estudar novas fontes de energia, além de trabalhar em conjunto com a indústria. Tendo em conta isto, um tema de muito interesse e que tem sido estudado com maior detalhe é a combustão da biomassa ou carvão em caldeiras.

Algumas regiões como a Amazônia do Brasil na América do Sul possuem populações isoladas que geralmente não estão ligadas à rede energética, porém contam com muita biodiversidade em suas plantações e suas atividades econômicas se caracterizam por trabalhar com a madeira. Tendo a biomassa um considerável valor energético, é possível aproveitar seu potencial térmico através da combustão usando pequenas caldeiras gerando eletricidade ou calor para estas populações. Também os recursos naturais são considerados de pouco impacto ambiental comparado com as fontes fósseis, por exemplo, na diminuição de CO₂.

A Dinâmica de Fluidos Computacional ou CFD usa o método numérico de Volumes Finitos para resolver as equações termodinâmicas e desenvolver modelos complexos como a

combustão, as vantagens desta simulação computacional são: diminuir os custos e o tempo dos experimentos, facilitando dados rápidos e certos das variáveis como a temperatura, a pressão, a fração molar e a velocidade em toda a caldeira ou local de onde se produz a combustão, sem interferir na operação normal do processo. Em alguns estudos sobre a combustão em caldeiras, a modelagem em CFD é comumente usada para: projetar e otimizar caldeiras com combustíveis sólidos em leito fixo e leito fluidizado, para solucionar problemas e identificar parâmetros de controle na operação das caldeiras e para analisar processos detalhados da combustão em estudos científicos.

O grupo de pesquisa NEST (Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída) da Universidade Federal de Itajubá trabalha em projetos sobre a geração de energia elétrica a partir das fontes renováveis, em sua abordagem se encontra a otimização de sistemas geradores de vapor como as caldeiras, nas quais envolve a conversão de energia térmica – química – mecânica – elétrica. O presente trabalho trata-se sobre a modelagem usando CFD, em uma caldeira de pequena capacidade, procurando o melhoramento dos processos da combustão, aumentando a eficiência e diminuindo a formação de poluentes.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver a modelagem dos processos da combustão de biomassa em leito fixo, usando o CFD, calculando as variáveis fluidodinâmicas e cinéticas dos processos para diminuir as perdas por combustão incompleta em caldeiras de pequena capacidade.

1.1.2 Objetivos específicos

Propor e desenvolver uma metodologia geral para a modelagem com CFD, dos processos da combustão de biomassa em leito fixo para caldeiras de pequena capacidade: pressão de trabalho 120 kg/h a e potência elétrica gerada de 15 kW, situada no laboratório do NEST da Universidade Federal de Itajubá.

Calcular através da modelagem o comportamento das variáveis fluidodinâmicas e cinéticas envolvidas nos processos da combustão na caldeira de estudo.

Propor melhoras na distribuição de ar, diminuindo as perdas da combustão incompleta na caldeira de estudo, usando a modelagem e a estratégia de análise proposta para o caso da combustão em leito fixo com biomassa.

1.2 Justificativa

Um estudo publicado pela *International Energy Agency* (IEA) em 2012 [1], mostrou a projeção até 2050 da tendência e desenvolvimento que deveriam ter as fontes energéticas para suprir a demanda da humanidade em 2050. Deste modo adverte a necessidade de desenvolver rapidamente projetos energéticos com tecnologias e processos que usem fontes energéticas renováveis, seja em cidades maiores, onde a demanda cresce, ou em populações isoladas, onde se podem aproveitar fontes energéticas situadas perto do lugar do consumo. Sendo que estes processos tecnológicos de estudo não podem descuidar o impacto ambiental, social e cultural gerados nas populações. Na figura 1.1 se observa a distribuição da demanda energética por fonte de energia prevista para o ano 2050, segundo [1].

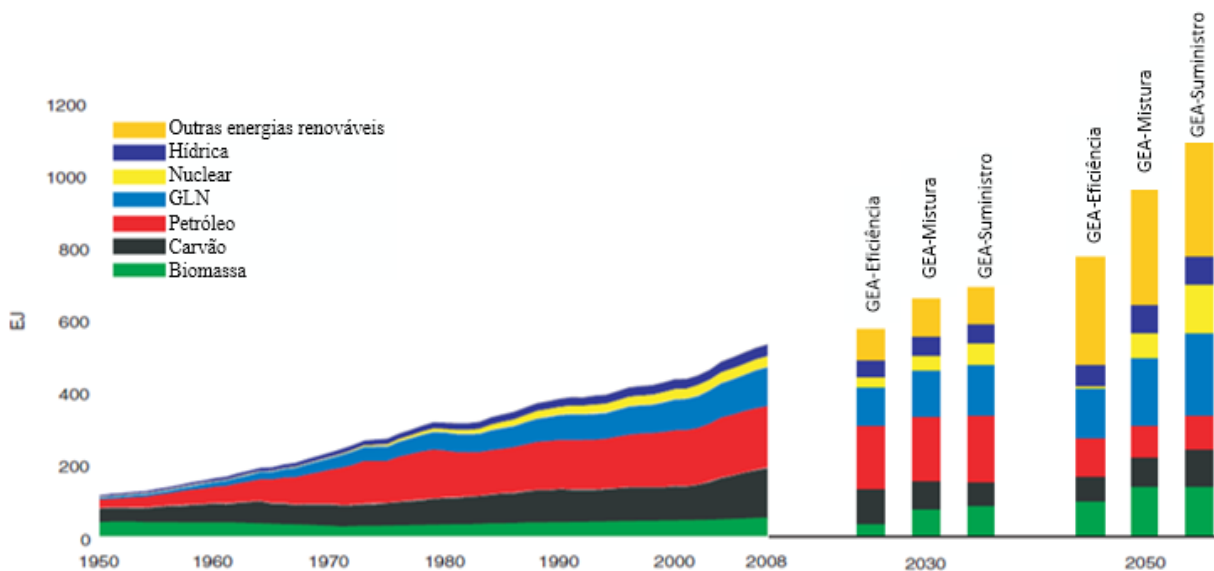


Figura 1.1 Tendência esperada da demanda energética mundial até 2050. [2]

Note-se que os desenvolvimentos dos processos de conversão da energia até o 2050 preveem diminuição no consumo do carvão e petróleo e acréscimos consideráveis em fontes renováveis, gás natural, biomassa, fontes hídricas e outras, como fontes primárias na transformação a energia elétrica. A inserção das fontes não fósseis deve-se lograr em duas etapas: a primeira até o 2030 onde se espera reduzir o consumo do carvão, manter o do petróleo e aumento no uso da biomassa; a segunda até o 2050 no qual a demanda do petróleo diminui consideravelmente sendo suprida pelas fontes de energias renováveis, o objetivo das duas etapas se mostra dividido em três focos de desenvolvimento, o primeiro é a eficiência dos sistemas de conversão de

energia, o segundo é misturar as fontes renováveis e o terceiro é trabalhar nos sistemas de fornecimento da energia.

Tendo em conta que atualmente a maior demanda das fontes energéticas são o petróleo e o carvão, visando os impactos ambientais causados por seus usos e o acréscimo nos custos do petróleo, se incentiva ao uso de fontes renováveis como a biomassa que segundo a IEA e a *Global Energy Assessment (GEA)* [1,2], a projeção estimada aumenta progressivamente, induzindo a desenvolver pesquisas em sistemas de conversão de energia com biomassa como no presente trabalho, onde se propõe a combustão da biomassa (madeira) em caldeiras para obter energia útil e reduzir a formação de CO₂ em comparação em caldeiras com carvão.

Outra motivação para o presente estudo foi a necessidade de desenvolver tecnologias que procurem fornecer eletricidade para populações isoladas de maneira eficiente, aproveitando os recursos naturais da mesma região. No Brasil e na América de Sul em geral, os países contam com populações isoladas, devido a motivos de localização principalmente por difícil acesso, condições socioculturais, e pelas leis do país baseadas na centralização dos recursos. No mapa da figura 1.2, pode-se ver os estados do Brasil onde existe o maior número de comunidades isoladas. Nestas regiões deve-se fomentar o uso de recursos próprios e sistemas de conversão de energia eficientes e de pouco impacto ambiental.

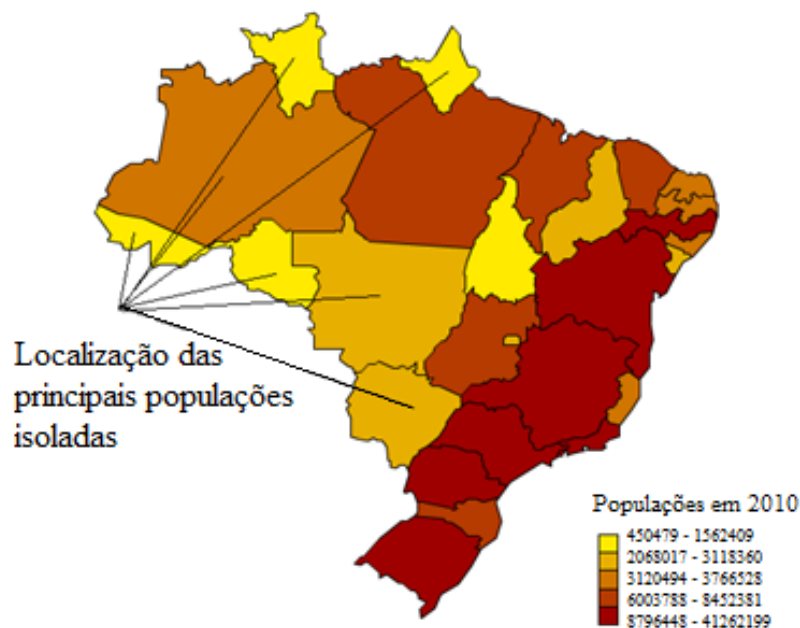


Figura 1.2. Mapa da população nos estados do Brasil no 2010. [3]

Note-se que os estados com menor população se encontram nas regiões do Noroeste e a parte

do Leste do Centro do Brasil onde são influenciadas pela selva Amazônica. O mapa da figura 1.3 mostra os principais municípios dos estados com maior produtividade de madeira a partir do extrativismo vegetal [4], as zonas do Brasil com maior produtividade de madeira são o noroeste e parte do centro, o que evidencia a relação entre a localização das populações isoladas com atividades de produção com a madeira, os processos de transformação da madeira geralmente produzem resíduos sem uso, os quais podem ser usados como matéria prima na geração de energia elétrica. Esta alternativa se apresenta como uma possível solução para suprir as necessidades energéticas destas populações, por isso neste trabalho estuda-se o melhoramento de pequenas caldeiras com madeira com o objetivo de aproveitar eficientemente os recursos destas regiões erando poucos impactos no ambiente.

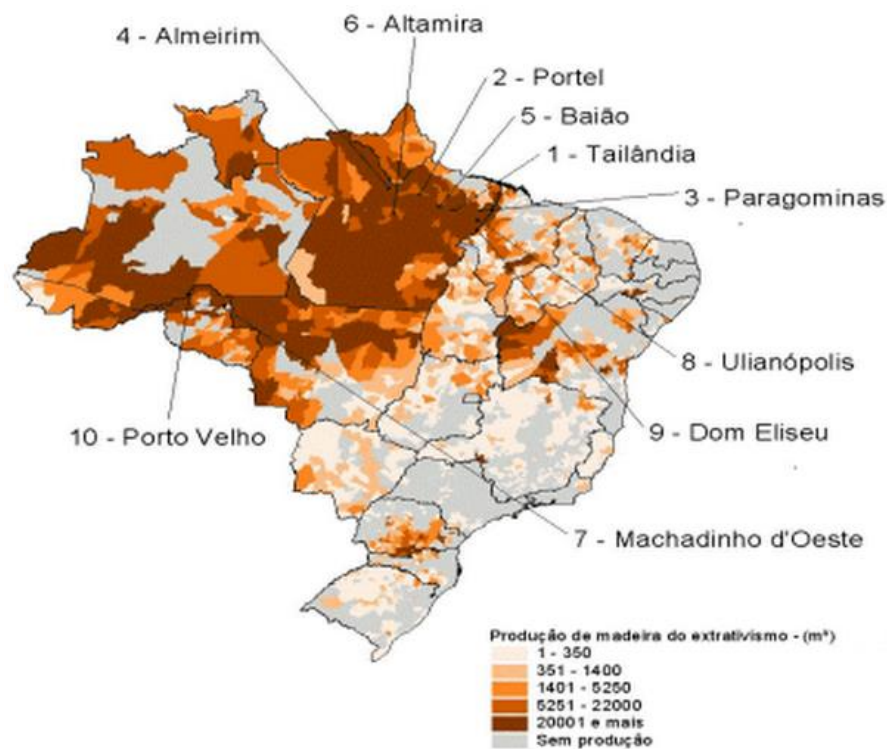


Figura 1.3 Produção da madeira a partir do extrativismo no Brasil. [4]

Para o estudo científico da combustão são necessárias as análises experimentais caras, porém foram criados modelos matemáticos complexos resolvidos em computadores sofisticados os quais usam vários tipos de modelagem, diferenciados principalmente pela complexidade e o recurso computacional. Os tipos de modelagem usados para a análise da combustão podem ser desde modelos simples de balanços de massa e energia, além de modelos de equilíbrio químico, ou modelos complexos que involucram a cinética da combustão em sistemas transitórios [5]. Neste trabalho o CFD é usado para solucionar modelos simples involucrados nos processos da combustão para propor melhoras que permitam aumentar a eficiência total da caldeira.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho se encontra dividido em 5 capítulos: O primeiro capítulo é a introdução, o segundo capítulo apresenta os fundamentos teóricos envolvidos na combustão de biomassa, o terceiro capítulo mostra os modelos matemáticos utilizados para o desenvolvimento, no quarto capítulo se descreve a metodologia usada para a modelagem da combustão de madeira no leito, no capítulo 5 é desenvolvida a metodologia e finalmente são mencionadas as conclusões que se obtiveram ao finalizar este trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos envolvidos no processo da combustão de biomassa, iniciando com a demanda energética, sistemas de conversão de energia, caracterização da biomassa, classificação das caldeiras, métodos de avaliação das caldeiras, equações de dinâmica de fluidos e de energia, finalmente se mostrará a revisão bibliográfica de outros estudos.

2.1 Oferta e demanda energética: Energias Renováveis

Mundialmente a demanda energética cresce rapidamente no decorrer dos anos, da mesma forma como se apresenta o acréscimo da população. Segundo as entidades mundiais energéticas [1,2], os principais focos de projeção para os próximos anos são o desenvolvimento das tecnologias para suprir algumas das necessidades humanas e a redução de impactos ambientais gerados pelos sistemas de conversão tradicional. O esquema da figura 2.1 mostra a estimativa do consumo da energia global no mundo, distribuída por fonte de energia primária.

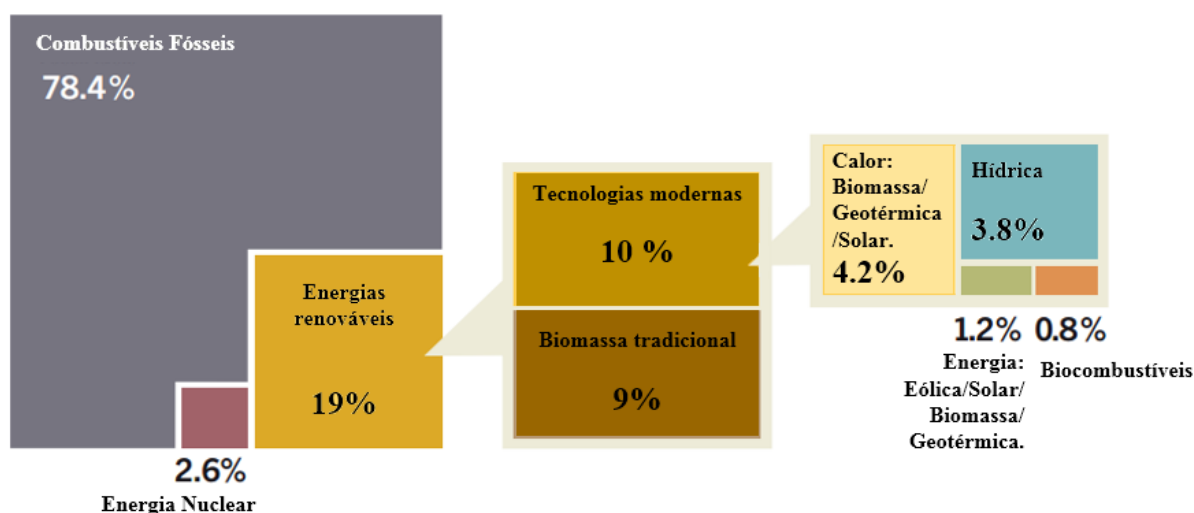


Figura 2.1 Estimativa da energia consumida no mundo. [6]

As estimativas atuais determinaram que a energia renovável proporciona 19% do consumo energético mundial e continuaram crescendo nos próximos anos [6]. A biomassa tradicional, que atualmente é usada para cozinhar e aquecer as zonas remotas e rurais nos países em

desenvolvimento representam aproximadamente 9%, porém as energias renováveis modernas aumentaram sua participação a 10% do consumo total.

No Brasil, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) 2014 [7], a oferta interna da energia por fonte primária mostra um comportamento similar ao mostrado na figura 2.1 do consumo energético mundial, por isso as fontes fósseis proporcionam maior energia ao consumidor seguido das fontes renováveis, mas no Brasil as energias renováveis apresentam maior demanda que a nível mundial. Na figura 2.2 encontram-se a oferta interna de energia no Brasil, no ano 2014.

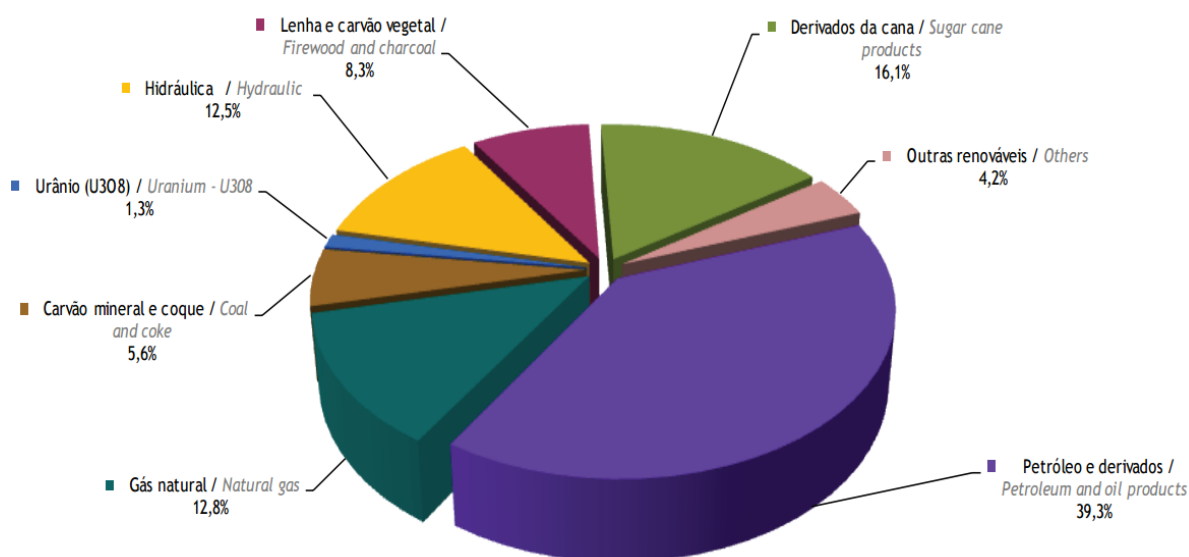


Figura 2.2 Oferta interna de energia no Brasil no ano de referência 2014. [7]

Tendo em conta os resultados do ano 2014 no Brasil [7], a oferta interna de energia para fontes renováveis é de 53,8%, a oferta energética para fontes primárias está representada para derivados da cana em 16,1%, gás natural 12,8%, hidráulica 12,5%, lenha e carvão vegetal 8,3% e outras fontes renováveis 4,2%, o que ressalta a importância das pesquisas com fontes renováveis como a biomassa.

2.2 Generalidades da biomassa

As tecnologias que utilizam a biomassa para fins energéticos, no século passado, tiveram um desenvolvimento bastante significativo, principalmente na Europa. No relatório desenvolvido por ANEEL [8], define-se a biomassa como qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. Dependendo da origem, pode ser

classificada em: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo). Os derivados obtidos dependem tanto da matéria-prima utilizada (cujo potencial energético varia de tipo para tipo), quanto da tecnologia de processamento para obtenção da energia [9].

Martini explicou em [9] que do ponto de vista químico a biomassa é um hidrocarboneto, com maior número de átomos de oxigênio na sua composição, diferentemente dos combustíveis fósseis. A presença desses átomos faz que a biomassa requeira menos ar, produzindo menos poluentes na combustão incompleta, mas conseqüentemente sua quantidade de energia a ser liberada é reduzida, o que é manifestado no seu Poder Calorífico. A biomassa vegetal é composta por celulose, hemicelulose e lignina, sendo que o teor de celulose varia de 40 a 50%, a hemicelulose de 20 a 40% e o teor de lignina de 25%, por isso a biomassa vegetal também é considerada como resíduo ligno-celulósico.

2.2.1 Aproveitamento da biomassa

A biomassa inclui uma variedade de recursos orgânicos, tais como a madeira e outros materiais vegetais da agricultura, silvicultura, e resíduos industriais. Vários processos tecnológicos são necessários e desenvolvidos para transformar os resíduos em recursos energéticos ou produtos utilizáveis, como o etanol, biodiesel, energia elétrica e outros produtos [10]. Na Figura 2.3 se mostra a cadeia de suprimento da biomassa.

Devido à diversidade de recursos de biomassa, suas aplicações não estão limitadas à produção de combustíveis ou de eletricidade, produtos auxiliares também podem ser produzidos durante o processo de conversão usando três principais tecnologias de conversão: bioquímica, termoquímica e processos de extração [11]. Alguns processos termoquímicos de conversão de energia utilizável a partir da biomassa são: combustão, gasificação, pirólise, digestão, fermentação e extração.

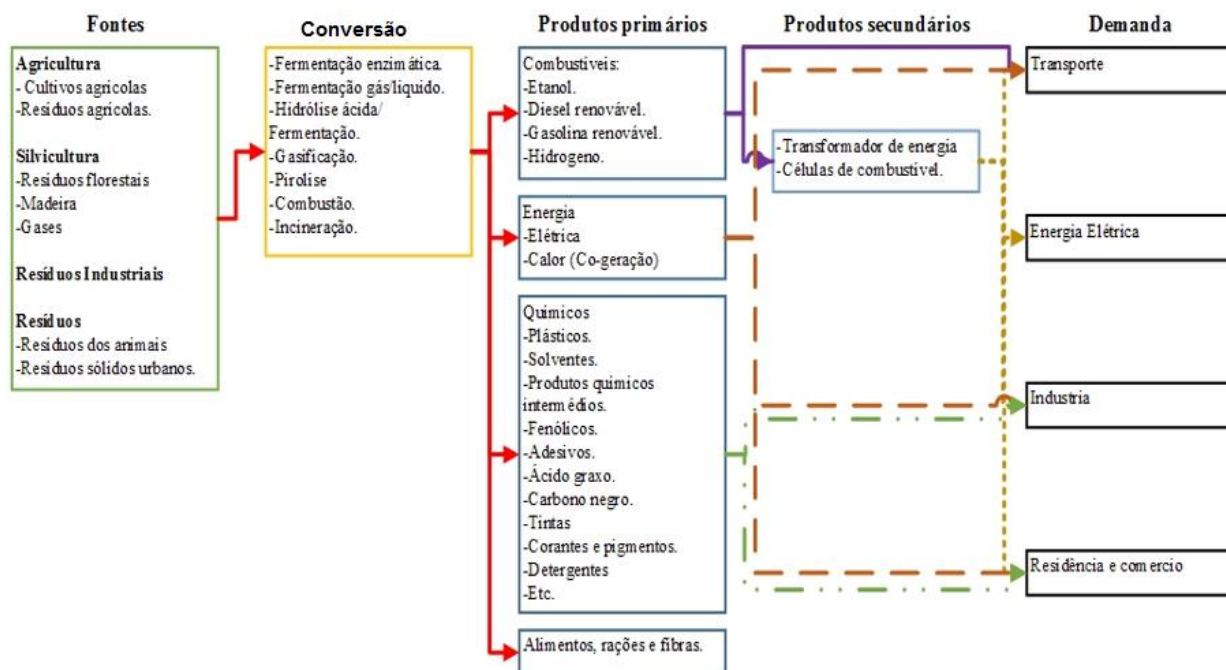


Figura 2.3 Cadeia de suprimento da biomassa. [10]

A energia da biomassa apresenta vantagens ambientais em comparação com qualquer combustível fóssil, porque não emite óxidos de nitrogênio e enxofre, além disso, o CO₂ lançado na atmosfera durante a queima é absorvido quase totalmente na fotossíntese, apresentando balanço aproximadamente a zero nas emissões [12]. A execução de projetos de uso de biomassa exige ainda iniciativas e políticas governamentais que internalizem os custos econômicos, sociais e ambientais externos das fontes convencionais de combustível, de modo que os combustíveis produzidos a partir da biomassa possam competir justamente.

2.2.2 Caracterização físico química da biomassa

A caracterização físico-química da biomassa inclui:

Granulometria: A granulometria fornece as frações em peso de cada dimensão característica que compõe a biomassa. Esta informação é importante para o dimensionamento do alimentador e para a definição da velocidade superficial dos gases. A análise granulométrica da amostra de partículas sólidas é obtida classicamente através da utilização de um conjunto de peneiras padronizadas [13].

Composição química imediata: Se refere ao conteúdo percentual, baseado na massa do combustível, do carbono fixo (F), matérias voláteis (V), cinzas (A), e eventualmente umidade

(W). O conteúdo de voláteis expressa a facilidade de se queimar um material. A fração de carbono fixo é o material que permanece na amostra depois de se liberar os voláteis. A umidade é a quantidade de água livre na biomassa.

Análise elementar: Trata-se de um ensaio empregado na determinação da composição química, e através desta o poder calorífico superior (PCS) dos combustíveis. Esse ensaio fornece os percentuais mássicos dos elementos, carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), enxofre (S) e cinzas (A), contidos na amostra da biomassa combustível. Esta análise é realizada seguindo as normas indicadas na tabela 2.1 [14,15].

Tabela 2.1. Métodos analíticos normalizados para determinação das propriedades físicas e químicas da biomassa. [17,20]

| Caraterização | Norma de avaliação |
|----------------------|---|
| - Granulometria | ASTM E828 |
| - Poder Calorífico | ASTM D 2015, E711 |
| - Análise imediata: | |
| Umidade | ASTM E871 |
| Cinzas | ASTM D1102 (873 K), ASTM E830 (848 K) |
| Matéria Volátil | ASTM E872, ASTM E897 |
| Carbono Fixo | Por diferença |
| - Análise elementar: | |
| Carbono, Hidrogênio | ASTM E777 |
| Nitrogênio | ASTM E778 |
| Enxofre | ASTM E775 |
| Cloro | ASTM E776 |
| Oxigênio | Por diferença |
| Cinzas | ASTM D3682, ASTM D2795, ASTM D4278, AOAC 14.7 |

Poder calorífico: Os valores do poder calorífico são tradicionalmente usados para quantificar a quantidade máxima de calor que pode ser gerada pela combustão com ar, nas condições padrão (STP) (25°C e 101,3 kPa). A quantidade de calor liberada da combustão depende do estado da fase no produto, se a água está na fase gasosa, o valor total de calor liberada denomina-se como o Poder Calorífico Inferior (PCI). Quando a água em forma de vapor é condensada a líquido, energia adicional (igual ao calor latente de vaporização) pode ser extraída, e a energia liberada denomina-se como Poder Calorífico Superior (PCS). A unidade deste valor no sistema internacional é (kJ/kg). O valor do PCI pode ser calculado a partir do PCS menos a quantidade de energia liberada durante a mudança de fase da água, de vapor a líquido, equação 2,1 [16].

$$PCI = PCS - \frac{N_{H_2O,P} * M_{H_2O} * h_{fg}}{N_{combustivel} * M_{combustivel}} \quad (2.1)$$

Onde $N_{H_2O,P}$ é o número de moles de água nos produtos. M_{H_2O} é a massa molecular da água. O calor latente da água a STP é $h_{fg} = 2,44$ MJ/kg. N e $M_{combustivel}$ são o número de moles e massa molecular do combustível, respetivamente.

Na tabela 2.2 se mostram o poder calorífico superior de alguns tipos de biomassa. Entre os valores mais altos de PCS das biomassas se encontram a madeira picada, eucalipto e bagaço de cana.

Tabela 2.2. Poder calorífico de diferentes tipos de biomassa, com umidade do 20 % [18].

| Biomassa | PCS (kJ/kg) |
|-----------------------|--------------------|
| Bagaço de Cana | 17.903,4 |
| Casca de Arroz | 16.775,6 |
| Restos de Algodão | 16.775,6 |
| Eucalipto | 18.420,0 |
| Sabugo de Milho | 18.972,6 |
| Cascas de Castanhas | 20.470,3 |
| Madeira Picada | 20.470,3 |
| Carvão mineral | 30.900,0 |

2.3 Caldeiras

As caldeiras são equipamentos que utilizam a combustão de combustíveis para produzir vapor de ótima qualidade, o vapor é usado para movimentar a turbina no sistema de geração de energia elétrica. Na indústria as caldeiras frequentemente usam o vapor para gerar energia elétrica e para processos internos. Tipicamente os combustíveis utilizados em caldeiras incluem carvão, óleo, gás natural, GLP, gases de resíduos e de processos, e resíduos de madeiras; a tabela 2 classifica as caldeiras conforme seu uso e sua capacidade de geração de calor. Na figura 2.4 se mostra uma caldeira industrial [19].

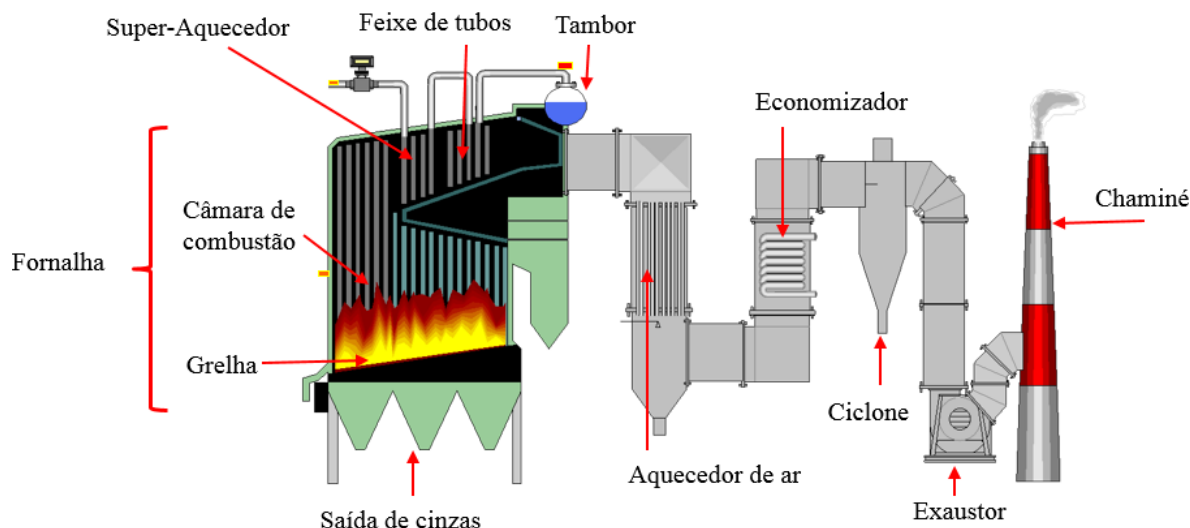


Figura 2.4 Esquema de uma caldeira industrial. [20]

As caldeiras são construídas de acordo com normas ou códigos vigentes para cada país e de forma a melhor aproveitar a energia liberada pela queima de um determinado tipo de combustível. O sistema de geração de vapor da figura 2.4 representa unidades industriais modernas de alta capacidade de produção de vapor [21].

As caldeiras podem ser classificadas conforme qualquer das seguintes características: finalidade, fonte de aquecimento, fluido que circula pelo interior dos tubos de transferência de calor, princípio de funcionamento, pressão de operação, tipo de fornalha e geração de vapor. A classificação das caldeiras por sua capacidade de produção de energia encontra-se na tabela 2.3, para o presente estudo vai se trabalhar com uma pequena caldeira de capacidade de 15 kW, a qual pode ser usada no setor residencial ou para pesquisas científicas, a caldeira de estudo está situada no laboratório do NEST.

Tabela 2.3 Classificação de caldeiras por sua capacidade de produção de energia [19]

| Utilidade | Geração energética MW/h |
|-------------------------|-------------------------|
| Industrial | > 3 |
| Comercial-Institucional | < 3 |
| Residencial-Pesquisa | < 1,5 |

As caldeiras que produzem vapor pela queima de combustíveis podem ser classificadas de acordo com o conteúdo nos tubos de aquecimento em três grupos: flamotubulares, aquatubulares ou mistas [22].

- a) **Caldeiras Flamotubulares:** Os gases quentes passam por os tubos do superaquecedor, ao redor dos quais está a água e o vapor de água. Os bancos de tubos são montados à maneira dos feixos de trocadores de calor, com um ou mais passos.
- b) **Caldeiras Aquatubulares.** Outro tipo, que é o mais empregado a nível industrial, como o próprio nome indica, tem circulação de água por dentro dos tubos e os gases quentes escoam pelo exterior dos mesmos. São usados para indústrias de maior porte que geram vapor superaquecido.
- c) **Caldeiras Mistas.** A necessidade de utilização de combustíveis sólidos para caldeiras pequenas fez surgir às caldeiras mistas. Basicamente são caldeiras flamotubulares com uma antecâmara de combustão com paredes revestidas de tubos de água. Na antecâmara se dá a combustão de sólidos usando grelhas de diferentes tipos e possibilitando o volume da câmara necessário aos combustíveis, como: lenha em toras, cavacos, etc.

Fornalhas. A fornalha é o componente da unidade geradora de vapor destinado a converter a energia química do combustível em energia térmica. De acordo com o tipo e com a granulometria do combustível, os projetos têm se alternando entre fornalhas para queima em suspensão, queima em grelha, ou queima em leito fluidizado [21].

2.3.1 Queima em grelha

As fornalhas de queima em grelha têm sido projetadas para atenderem caldeiras de pequeno e meio porte, em geral com capacidades inferiores a 200.000 kg/h de vapor. Apesar das limitações, as fornalhas de grelha fixa ainda assumem importante papel no campo da geração de vapor, principalmente por se adaptarem ao consumo de vários tipos de combustíveis: carvão fóssil, lenha, bagaço de cana e diversos resíduos industriais. A queima em grelha não exige uma preparação rigorosa do combustível. Entretanto, deve-se assegurar uma granulometria uniforme e que a alimentação corresponda às oscilações de carga da instalação. O suprimento do ar é assegurado por ventiladores que forçam o ar através do leito (ar primário) e no interior da câmara de combustão (ar secundário) [21].

2.3.2 Eficiência de caldeiras

Durante a operação de uma caldeira é indispensável monitorar constantemente a eficiência deste equipamento, devendo-se recorrer inevitavelmente aos balanços de massa e energia para obtenção dos índices que traduzem o rendimento da caldeira. O cálculo da eficiência global da

caldeira pode ser realizado por duas maneiras [20]. A descrição matemática dos métodos se mostra na tabela 2.4.

Método direto: consiste na contabilização dos fluxos energéticos de entrada e saída. Embora seja um método simples, ele não fornece informações sobre as principais perdas do sistema.

Método indireto: consiste no cálculo da eficiência a partir da contabilização das principais perdas existentes em uma caldeira as quais são: perdas associadas ao combustível nas cinzas de fundo, perdas por radiação e convecção, perdas por purga, perdas associadas à combustão incompleta.

Tabela 2.4. Métodos para o cálculo da eficiência nas caldeiras.

| Método direto | Método indireto |
|---|-----------------|
| $\eta_{Caldeira} = 100 \times \frac{m_{vapor} \times (h_{vapor} - h_{agua})}{m_{combustível} \times PCS} \quad \eta_{Caldeira} = 100\% - \sum Perdas$ | |

A dificuldade de medir a eficiência pelo método direto está em conhecer com precisão a quantidade do combustível queimado. Por este motivo se programa o uso do método indireto para controlar a eficiência da caldeira, este processo se realiza segundo as normas ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) [22], sendo que a norma utilizada é a ASME-PTC 4.1. As perdas estão relacionadas com:

- Perdas pelos gases secos da Chaminé (P1): São determinados com a seguinte equação.

$$P_{GS} = \frac{M_{GS} C_P (T_G - T_A)}{P.C.S} \quad (2.2)$$

Onde, T_G= Temperatura na chaminé; T_A=Temperatura de ar da combustão ou de referência. E a massa dos gases secos M_{GS} se determina com:

$$M_{GS} = \frac{11CO_2 + 8O_2 + 7(CO + N_2)}{3(CO_2 + CO)} * \left[\left(\frac{\%C}{100} - \frac{R * PC_R}{14500} \right) + \frac{\%S}{267} \right] \quad (2.3)$$

As concentrações de CO₂, O₂, N₂ e CO são medidas com o analisador de gases. %C e %S são as porcentagens do carbono e enxofre do combustível. R são a quantidade dos resíduos da combustão e PC_R é o poder calorífico dos resíduos.

- Perdas por formação de água na combustão de H (P2):

$$P_{CH} = \left(\frac{(9H_2 / 100)(H_g - H_a)}{P.C.S} \right) \quad (2.4)$$

Onde, H_2 é percentagem, em peso de H no combustível. H_g e H_a são as entalpias dos gases e do vapor de água.

- Perdas por umidade do combustível (P3):

$$P_W = \left(\frac{\left(\frac{\%W}{100} \right) (W_g - W_a)}{P.C.S} * 100 \right) \quad (2.5)$$

Onde, %W a percentagem em peso da umidade de combustível.

- Perdas pelos não queimados (P4): Perdas da energia contida nas cinzas.

$$P_I = \frac{M_{CI}(P.C.C)}{P.C.S} \quad (2.6)$$

Onde, M_{CI} é o material combustível conteúdo nas cinzas e P.C.C é o poder calorífico do carbono.

- Perdas por radiação (P5): Perdas de energia (calor) ao meio ambiente obtida através de tabelas.
- Outras perdas (P6): Considera-se entre 1 a 1,5 % da energia entregue a caldeira.

O diagrama de Sankey da figura 2.5 mostra as perdas da energia em uma caldeira pelo método indireto. Sendo que a eficiência da caldeira é o 100 per cento da energia contida no combustível menos as perdas que se produzem nos processos.

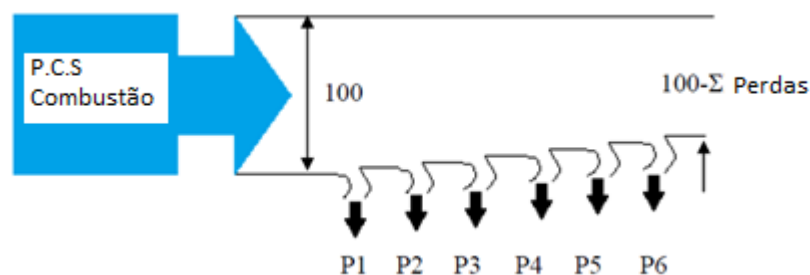


Figura 2.5 Diagrama de Sankey da eficiência da caldeira com o método indireto.

2.4 Processo da Combustão

A queima direta, ou combustão, é a tecnologia de conversão mais antiga e mais difundida comercialmente. Energeticamente, aplica-se para combustíveis sólidos como a madeira e para outros diversos resíduos agroindustriais como o bagaço de cana e a casca de arroz. [14]

A combustão da biomassa envolve processos físico-químicos de elevada complexidade. A combustão da biomassa pode ser modelada como a sequência das seguintes fases: ignição, secagem, pirólise e combustão do resíduo carbonoso. A importância relativa destas fases varia de acordo com as propriedades do combustível e o tipo de queimador. Na combustão de biomassa em grandes instalações, com alimentação contínua, tais como as grelhas móveis, as diferentes etapas podem ocorrer simultaneamente em várias secções da grelha. No entanto em aplicações de pequena escala, em grelha fixa, há uma separação distinta entre a pirólise e a combustão do resíduo carbonoso, no tempo e no espaço [21].

Demirbas [23] descreve os processos que ocorrem durante a combustão de uma partícula da biomassa, incluindo os produtos das reações e a faixa de temperaturas correspondente, ver figura 2.6. O processo de secagem ocorre na zona A, a temperaturas inferiores a 473 K, liberando-se vapor de água. Entre 473 e 535 K libera-se uma pequena quantidade de monóxido de carbono para além das espécies anteriores, sendo que esta faixa de temperaturas corresponde à zona B. Até este ponto as reações são nas suas maiorias endotérmicas, os produtos são de difícil condensação e a biomassa começa a carbonizar.

A pirólise, que corresponde à zona C, ocorre entre 533 e 775 K. As reações são exotérmicas produzindo gases tais como monóxido de carbono, metano, formaldeído, ácido fórmico, ácido acético, metanol e hidrogénio e começa a se formar o resíduo carbonoso. Esta fase é crucial para a combustão da biomassa, uma vez que, ao contrário do carvão mineral, a principal fonte de energia provém da queima dos voláteis, tendo sido observado que no caso da madeira e da palha, corresponde a cerca de 67% da energia total liberada na combustão [23]. De fato, uma das vantagens da biomassa em relação com o carvão é o elevado teor em matéria volátil, o que facilita a sua combustão, no entanto, esta diferença faz com que os sistemas projetados para a combustão do carvão não sejam inteiramente apropriados para a combustão de biomassa [24].

A partir de 775 K, na zona D, forma-se uma camada de resíduo carbonoso. À superfície das partículas de biomassa, o vapor de água e os voláteis misturam-se com ar ambiente reagindo

com o oxigénio, formando a chama. O sentido da difusão é em direção ao exterior da partícula [23].

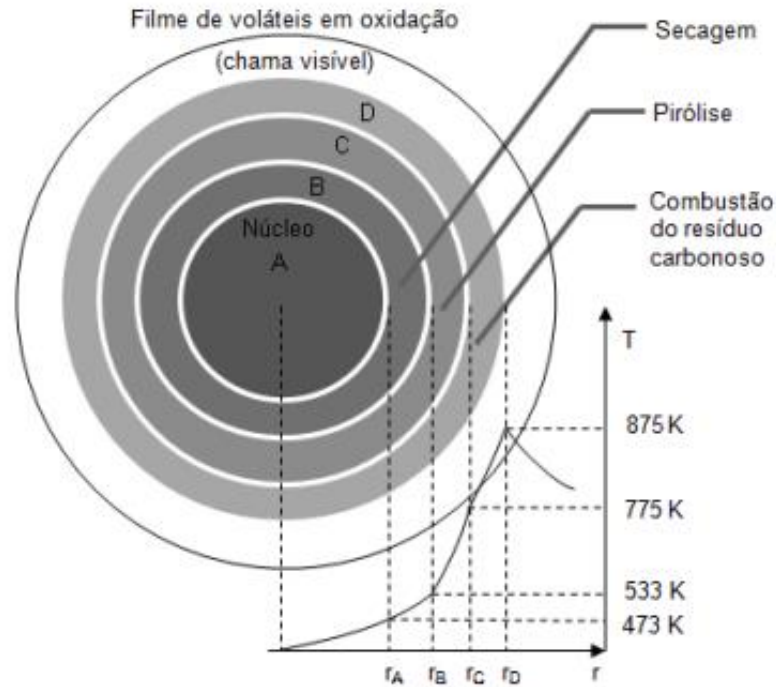


Figura 2.6 Modelo da combustão de biomassa representada como uma partícula esférica [23].

2.4.1 Combustão de madeira

A figura 2.7 relaciona a fração em massa consumida durante a combustão e a temperatura que corresponde a cada das etapas da combustão para o caso da queima da madeira. Durante o processo de combustão da madeira deve ter-se em conta que este processo ocorre primeiramente em uma etapa homogênea (queima dos voláteis) e depois em uma etapa heterogênea (combustão do resíduo de carbono ou coque) [14].

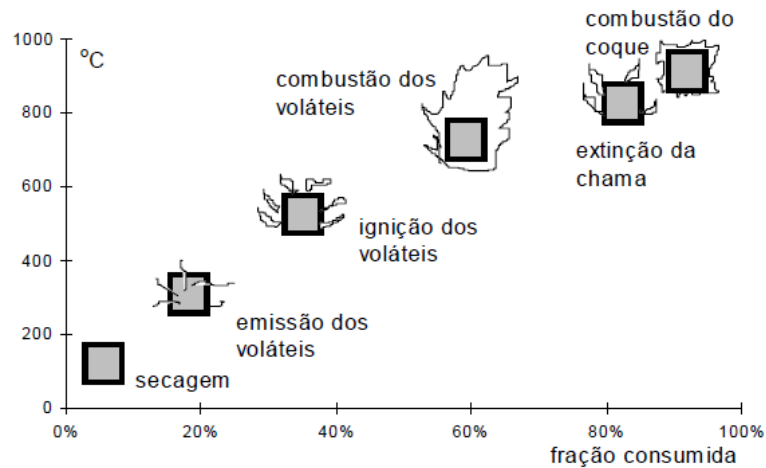


Figura 2.7. Etapas da combustão da madeira [25].

Quando se queima biomassa em leito fixo sobre a grelha, os voláteis se desprendem e são queimados sobre o leito. Deste modo pode-se entender a conveniência de dividir o fluxo de ar de combustão em duas partes: ar primário, para a combustão do resíduo de coque e ar secundário, para a combustão dos voláteis, como é feito em sistemas industriais [14].

As principais reações da biomassa no processo da combustão são mostradas na tabela 2.5.

Tabela 2.5. Principais reações da biomassa no processo de combustão de madeira [26].

| Combustão no leito de combustível | | Combustão fase gasosa | |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------------|---|
| $C_{solid} + 1/2O_2$ | \longrightarrow | CO | $CH_4 + 1/2O_2 \longrightarrow CO + 2H_2$ |
| $C_{solid} + 2O$ | \longrightarrow | CO ₂ | $CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$ |
| $C_{solid} + H_2O$ | \longrightarrow | CO + H ₂ | $CO + 1/2O_2 \longrightarrow CO_2$ |
| $N_{solid} + 1/2O_2$ | \longrightarrow | NO | $H_2 + 1/2O_2 \longrightarrow H_2O$ |
| | | | $H_2S + 1 + 1/2O_2 \longrightarrow SO_2 + H_2O$ |
| | | | $NH_3 + O_2 \longrightarrow NO + H_2O + 1/2H_2$ |
| | | | $NH_3 + NO \longrightarrow N_2 + H_2O + 1/2H_2$ |
| | | | $NO + CO \longrightarrow 1/2N_2 + CO_2$ |

Neste trabalho pretende-se simular a combustão da madeira mediante reações em fase homogênea e heterógena simultaneamente, usando o método de volumes finitos.

2.5 Métodos Numéricos: Dinâmica Computacional de Fluidos (CFD)

Para resolver problemas de engenharia podem ser aplicadas três metodologias fundamentais, os métodos analíticos, a experimentação e os métodos numéricos [27].

Métodos analíticos. Tem como objetivo resolver equações diferenças dos modelos matemáticos, mas é aplicável geralmente para geometrias e condições de contorno simples.

Experimentação. Sua maior vantagem corresponde ao fato de trabalhar com a configuração real do equipamento e do processo submetido as análises. No entanto, isso envolve um alto custo e algumas vezes, o experimento não pode ser realizado por questões de segurança ou pela dificuldade de reproduzir as condições reais.

Métodos numéricos. Resolvem equações diferenças matemáticas, sendo capaz de resolver problemas com geometrias complexas, com diversas condições de contorno, para isso existem diferentes metodologias e estratégias, uma delas é os Métodos de Volumes Finitos (MVF) que discretiza as variáveis das equações diferenciais, para calcular os valores das variáveis do problema, o que significa, aproximar uma variável continua em um número finito de pontos [28], ver figura 2.8

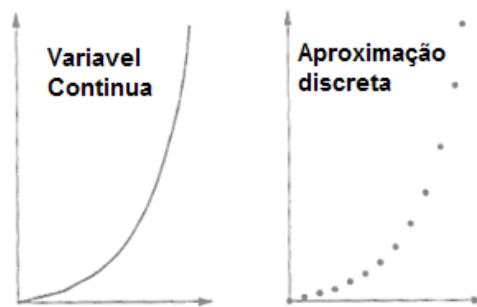


Figura 2.8 Discretização das variáveis. [28]

Atualmente para discretizar as variáveis e resolver as equações diferenciais complexas com relativa rapidez, são usados recursos computacionais. Esta técnica é conhecida como **Dinâmica de fluidos Computacional (CFD)**, a qual resolve as variáveis das equações de conservação: dinâmica de fluidos, energia e reações químicas, entre outras; obtendo valores das variáveis aproximados aos valores reais do problema [28]. Os elementos principais no CFD são:

1. Limitação do problema em um domínio, estabelecendo condições de contorno nas entradas, saída e fronteiras.
2. Discretização do meio contínuo: as variáveis de campo (ρ , μ , v , w , p ...) se aproximam para um número finito de valores, calculados em pontos para cada volume de controle.
3. Discretização das equações de movimento, o que significa que as variáveis se aproximam em função dos valores para cada volume de controle.

4. O sistema de equações algébricas é resolvido, obtendo valores das variáveis em todos os volumes de controle que fazem parte do domínio.

Neste trabalho se vai utilizar os MVF para discretizar e resolver as equações de conservação de massa, continuidade e energia, utilizando o CFD, sendo calculadas as variáveis que fazem parte dos processos da combustão em qualquer lugar da caldeira.

2.6 Modelagem com CFD da Combustão de Biomassa em Leito

A combustão é modelada matematicamente por dois tipos de análise dependendo do foco de estudo, estes são: a abordagem Euleriana, onde as fases sólida e gasosa são consideradas como fluidos contínuos, e a abordagem Euleriana - Lagrangiana, onde a fase gasosa é considerada como fase contínua e o sólido ou combustível, como fase discreta para cada partícula.

A modelagem da combustão de biomassa em leito fixo em caldeiras, envolve a simulação das reações do sólido no leito fixo, que para o caso da modelagem representa o combustível sobre a grelha; e ao mesmo tempo as reações da fase gasosa dentro da fornalha [29]. Usualmente softwares comerciais de CFD são utilizados pela engenharia, principalmente para resolver as equações de governo da fase gasosa e a interação entre o leito do combustível e os gases, porém em termos de modelagem da combustão em leito fixo suas capacidades são muitas vezes limitadas. Três principais abordagens são consideradas na solução deste problema [30]:

1. A primeira opção é um método simples que consiste no uso das condições de entrada baseadas em medições experimentais sobre a superfície superior do leito de combustível, estas podem ser introduzidas através de uma função uniforme de posição sobre a superfície. Outras condições de entrada do modelo se calculam através do balanço de massa e energia, com os componentes do combustível e o escoamento do ar primário.
2. A segunda abordagem é o mais complexo e consiste em separar com submodelos as reações que acontecem no leito, para calcular a temperatura, composição do gás e velocidade na superfície do leito fixo. Os códigos de programação são necessários para acoplar os submodelos do leito e o modelo de radiação, deste modo o calor radiativo emitido pela chama e pelas paredes da fornalha interage com a superfície superior do leito de combustível, posteriormente os valores calculados na superfície superior do leito são realimentados para a próxima iteração da modelagem. Além disso, devido à

complexidade da simulação das reações no leito, há parâmetros desconhecidos, porém algumas simplificações são feitas, para justificar estas suposições precisam-se avaliar estudos de sensibilidade sobre os efeitos dos parâmetros-chave da combustão e a cinética da combustão (por exemplo, os efeitos do teor de umidade, densidade de partículas, tamanho, forma, poder calorífico, porosidade do leito, e os parâmetros de transferência de calor, capacidade de calor de gases, etc.).

3. A terceira abordagem é definir sub-rotinas com algumas das funções estabelecidas dentro do código do CFD, estas funções são conhecidas como *User Definition Function* (UDF). Estas funções contêm os detalhes essenciais para interagir a fase sólida com a gasosa. Uma forma simples deste método é supor o leito do combustível como uma zona porosa e logo escrever algumas UDF descrevendo as reações no leito: a umidade, voláteis e CO₂ liberados e a energia liberada. A abordagem da zona porosa é particularmente útil para situações em que os comportamentos globais dos processos e o desempenho da caldeira precisam ser avaliados, em lugar de estudar detalhadamente o processo da combustão.

A figura 2.10 apresenta o esquema geral da solução utilizada para a modelagem da combustão de biomassa em leito fixo em grelha móvel [29,30,31,32]. No esquema pode se ver a interação dos submodelos do leito com a fase gasosa, interagindo principalmente pela radiação e o transporte das espécies entre as fases.

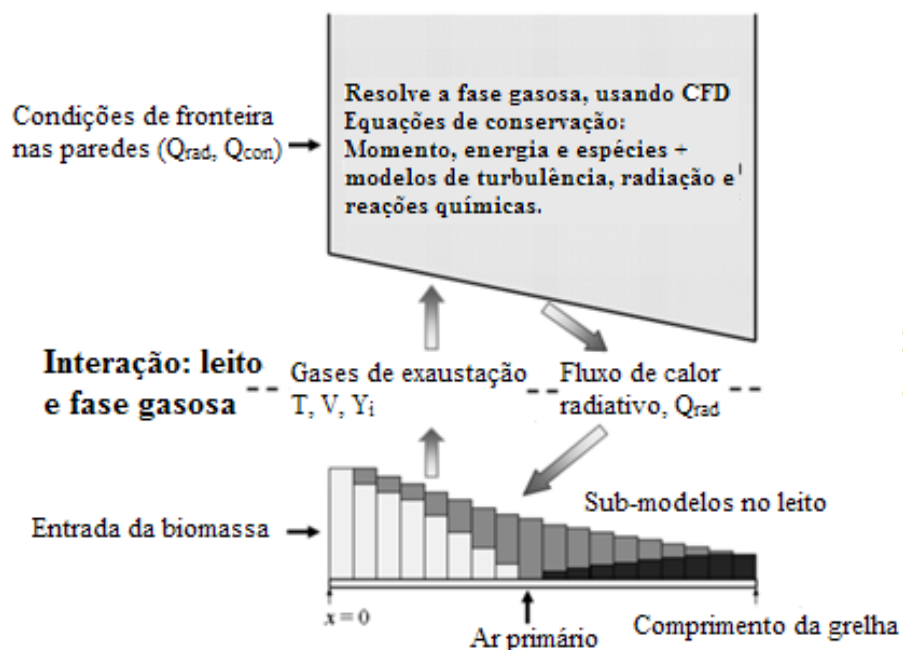


Figura 2.9. Esquema da modelagem da combustão de biomassa em grelha, usando CFD [30].

Geralmente se assume que a modelagem dos processos da combustão de biomassa em leito de combustível deve ser dividida em quatro subprocessos que são executados simultaneamente: evaporação da umidade, liberação dos voláteis, formação e queima do carbono residual [31]. Estes processos são calculados pela estratégia selecionada por cada autor, que pode ser mediante o balanço da massa e de energia, ou em alguns casos por meio de softwares externos especializados. O CFD é o encarregado de interagir os subprocessos do leito com os modelos da fase gasosa; no entanto, a simplificação das modelagens nos processos da combustão realizados com CFD são de qualidade aceitável principalmente para projetos industriais e de otimização, o qual foi comprovado neste trabalho.

2.6.1 Modelagem da combustão no leito de biomassa

O leito do combustível é a parte mais inovadora das pesquisas na modelagem da combustão de sólidos que são queimados sobre a grelha, onde ocorre a maioria dos processos da combustão: a secagem, a liberação dos voláteis, a formação e a queima do resíduo carbonoso. No leito calculam-se os termos fontes das espécies e da energia liberada nestes processos, e são estabelecidos como condições de entrada para a modelagem da fase gasosa, os quais interagem mediante as equações de conservação e os modelos de radiação e de turbulência aplicados na modelagem com CFD.

O leito de combustível é geralmente representado e tratado como meio poroso onde a fase sólida apresenta as características físicas do combustível e a fase gasosa as características do ar e os gases de exaustão. Em estado estável, o leito é simulado como um meio contínuo em diferentes processos da combustão, onde cada um destes é modelado no estado de equilíbrio nas equações de conservação, sendo que a composição do combustível não varia com a temperatura [32].

Os submodelos do processo de combustão que ocorrem no leito são:

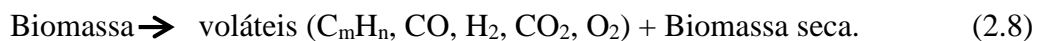
Evaporação da umidade: A biomassa contém água armazenada nos poros devido às forças capilares da água e são ligadas à estrutura da biomassa por forças intermoleculares. Quando a biomassa entra na fornalha, inicia-se o processo da secagem pela parte frontal do leito, devido ao calor transferido. A equação 2.7 descreve a composição da biomassa tendo como referência a biomassa em base seca.

$$\text{Biomassa} = \text{Água} + \text{Biomassa seca.} \quad (2.7)$$

Depois de que a água é evaporada, e pelo aumento na temperatura da biomassa e dos gases, inicia-se o processo de liberação dos voláteis [33].

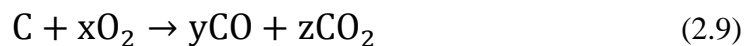
As técnicas para o cálculo do termo fonte da água evaporada é realizada de diferentes maneiras dependendo do autor. A mais comum é usada por Jurena [34], onde assume-se que na superfície superior do leito a evaporação inicia-se quando a temperatura supere 100°C para modelagens em estado transitório. Segundo Kaer [35] o termo fonte de vapor liberado pode ser calculado mediante uma taxa de reação de Arrhenius e com a quantidade de voláteis contidos em cada célula a diferentes temperaturas. Enquanto que para modelagem em estado estável o termo fonte é calculado do balanço de massa.

Liberação dos voláteis: A maior diferença entre a combustão do carvão mineral e da biomassa se indica neste submodelo, devido a que a biomassa tem um maior teor de voláteis os quais são liberados de diferentes maneiras neste sub-processo. A equação 2.8 mostra a decomposição da biomassa neste submodelo.



Este submodelo tem várias formas de ser modelado dependendo do autor, devido aos mecanismos de formação, a taxa de decomposição da biomassa e a composição final de voláteis [34]. Os pesquisadores Kaer [35] e Chungen [29] tratam os voláteis como um pseudo-produto, mediante o balanço das espécies e da energia, a qual é consistente com a energia geral da reação.

Queima do carbono residual: O carbono residual é formado após a liberação dos voláteis da biomassa. O carbono é oxidado a CO e CO₂, a maioria dos autores [29,30,34, 35], simulam este submodelo com a reação apresentada na equação 2.9.

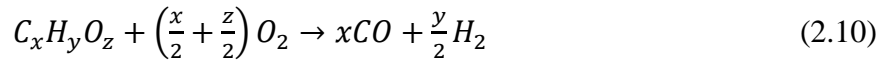


Os termos fontes de O₂ consumido e de CO e CO₂ liberados são calculados com o balanço de massa, a energia é estimada experimentalmente [30].

2.6.2 Modelação da combustão na fase gasosa

Para a simulação das reações na fase gasosa no volume da fornalha é usada a modelagem CFD, o qual além de resolver a reações da fase heterogênea mostradas nas equações 2.10 e 2.11, é o

encargado de interagir as equações de conservação em estado de equilíbrio com os modelos de radiação e turbulência, para isso é necessário selecionar o modelo de turbulência e radiação dependendo do problema de estudo e a capacidade do recurso computacional a ser usado. Na tabela 2.7 mostra-se o resumo dos modelos de turbulência e radiação escolhidos por diferentes autores.



Note-se da tabela 2.7 que o modelo k- ϵ , é o modelo de turbulência mais usado, enquanto o uso do modelo de radiação se divide em o modelo P-1 e o modelo DO pelos pesquisadores. As taxas cinéticas para as reações na fase gasosa podem ser modeladas utilizando o método de transporte de espécies [30].

Para o presente trabalho, foi modelada a combustão de madeira na fornalha, em duas partes: no leito fixo, onde se dividiu a combustão em três submodelos que acontecem simultaneamente, a secagem, a liberação dos voláteis e a queima do carbono residual, para isso foram calculados os termos fontes de o vapor de água, os voláteis, o monóxido de carbono e o oxigênio consumido na queima do carbono residual, aplicando o balanço de massas, do mesmo modo a energia liberada pelo leito foi calculada para cada submodelo, mas foi estabelecida como um termo fonte de energia geral produzido no leito.

A fase gasosa, foi modelada usando o CFD para resolver as equações de conservação de massa, energia e continuidade interagindo com o leito de combustível, deste modo os termos fontes obtidos na combustão no leito foram considerados como condições de entrada para este modelo, além disso, foram aplicados os métodos de radiação, turbulência e de reações químicas em condições de regime permanente, para calcular os valores das variáveis dos processos em qualquer lugar da fornalha.

Tabela 2.6. Recompilação de trabalhos com os modelos selecionados para a combustão de biomassa em leito.

| Autor | Estudo | Modelo de turbulência | Modelo de radiação | Transporte de Espécies | Referencia |
|--------------|--|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Chaney, J. | Pellet biomassa, caldeira de 50 kW, grelha fixa. | K-ε | P-1 | Sim | 30 |
| Sui, J. | Briquetes de 3 tipos de biomassa e carvão. Grelha fixa | Standard Realizável k-εpsilon | P-1 | - | 31 |
| Scharler. | 5 tipos de biomassa, 16 kW, grelha fixa | - | - | Sim | 33 |
| Beng, H. | madeira, grelha fixa | K-ε | - | Sim | 32 |
| Miltner, M. | Caldeira 2MW, biomassa | SST-k-ω | DO | Sim | 56 |
| Chaney | Caldeiras de 0.5 - 10 MW. Grelha fixa. | Standard Realizável k-εpsilon | DO | Sim | 30 |
| Jurena. T. | Straw, Grelha fixa | - | - | Sim | 34 |
| Yin, Ch. | biomassa, Grelha fixa | - | - | Sim | 35 |
| Yin, Ch. | 108 MW. biomassa, Grelha fixa | k-εpsilon standard | DO | Sim | 29 |
| Yang, Y. B. | biomassa. Grelha em movimento | k-εpsilon standard | DO | Sim | 48 |
| Porteiro, J. | Pellet Biomassa. 24 kW. Grelha fixa. | k-εpsilon standard | DO | Sim | 49 |
| Collazo, J. | Pellet Biomassa. 24 kW. Grelha fixa. | k-εpsilon standard | DO | Sim | 50 |

A modelagem deste trabalho tem como objetivo comparar dois cenários de operação com diferentes vazões de ar primário e secundário no regime permanente. Depois da análise do cenário atual propor melhoras no desenho e operação da caldeira, usando baixo custo computacional.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA EM LEITO

Neste capítulo se descrevem o método matemático de volumes finitos, posteriormente se descrevem os modelos matemáticos que são usados para simular os processos da combustão de biomassa em leito fixo na fornalha, os modelos se apresentam em seguida.

3.1 Métodos de Volumes Finitos MVF

Os Métodos de Volumes Finitos (MVF) aproxima as equações diferenciais do problema por um sistema de equações algébricas em pontos discretos no espaço e tempo.

Na modelagem da combustão em leito de combustível o MVF, utiliza como ponto de partida a forma integral das equações da conservação. O domínio de solução é dividido num número finito de volumes de controle (VC) contíguos, e as equações da conservação são aplicadas a cada VC. No centroide de cada VC localiza-se um nó computacional, no qual são calculados os valores das variáveis, e nas superfícies dos VC estes são obtidos por interpolação em função dos valores nodais (centro do VC). As integrais de volume e de superfície são aproximadas usando fórmulas de quadratura apropriadas. Como resultado, obtém-se uma equação algébrica para cada VC, na qual aparecem os valores calculados no nó e nos nós vizinhos [27].

Neste trabalho foi utilizado o Método Numérico de Volumes Finitos aplicando o CFD para resolver as equações diferenciais que governam a combustão de biomassa em caldeiras, usando o software comercial ANSYS Fluent® V.14.

3.1.1 Discretização das equações de Navier-Stokes

As equações de Navier-Stokes são equações diferenças parciais não lineares que descrevem o escoamento de fluidos Newtonianos. Estas equações permitem determinar os campos de velocidade em um escoamento. Para aplicar a equações de Navier-Stokes, é necessário fazer algumas suposições sobre os fluidos. O fluido é um meio contínuo o que significa que todas as variáveis de interesse tais como pressão, velocidade, densidade, temperatura, entre outras, são diferenciáveis (isto é, não tem transição de fase).

A solução analítica das equações de Navier-Stokes é praticamente aplicável para escoamentos simples em condições simplificadas, por isso, para a solução de escoamentos reais em engenharia opta-se por substituir as equações por aproximações algébricas de forma que possam ser calculadas por um método numérico. [38,39]

A metodologia de solução numérica baseada em volumes de controle consiste em três passos fundamentais:

- Divisão do domínio de solução em volumes de controle mediante o uso de uma malha computacional.
- Integração das equações que regem o escoamento para cada volume de controle, convertendo-as em equações algébricas das variáveis discretas dependentes (desconhecidas), tais como velocidades, pressão e escalares de conservação.
- Linearização das equações discretizadas e solução do sistema linear de equações para atualizar os valores das variáveis dependentes.

3.1.2 Acoplamento Pressão – Velocidade

Esta técnica emprega um algoritmo que faz parte dos métodos de projeção, onde a restrição de conservação da massa (continuidade), no campo de velocidades é alcançada através da resolução de uma equação de pressão (ou correção da pressão), derivada da equação de continuidade e das equações de quantidade de movimento [38,39].

Sempre que as equações que regem o escoamento sejam não lineares e acopladas uma à outra, o processo de solução envolve iterações onde todo o conjunto de equações é resolvido repetidamente até atingir a convergência.

A técnica de acoplamento Pressão-Velocidade se aplica para o escoamento de fluidos incompressíveis.

Existem dois tipos de algoritmos, como mostrado na figura 2.8:

- Algoritmo segregado (separado): Neste algoritmo as equações são resolvidas sequencialmente (uma após a outra). O requerimento computacional é pouco, mas a convergência é relativamente baixa.

- Algoritmo acoplado: O sistema de equações é resolvido em conjunto. Neste caso, a convergência melhora significativamente, comparada com o método segregado; no entanto, o requerimento computacional é de 1,5 a 2 vezes maior.

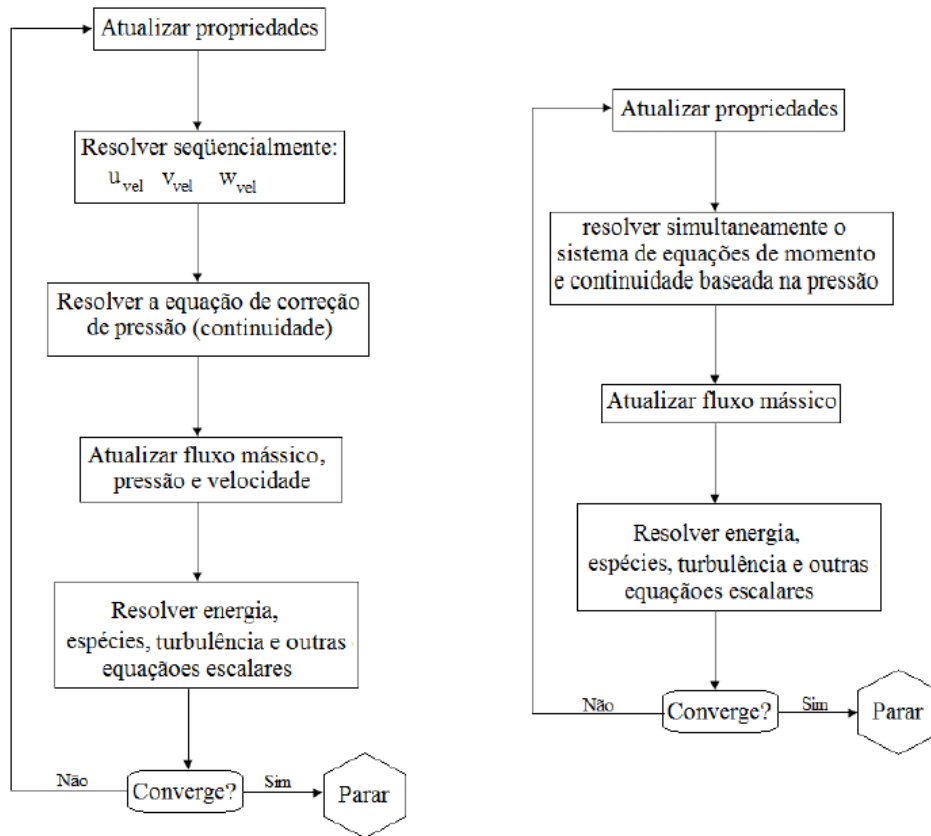


Figura 3.1. Fluxograma dos métodos de solução do solver baseado na pressão. a) algoritmo segregado, b) algoritmo acoplado. [Fonte adaptada: 39]

3.1.3 Erros dos métodos matemáticos

Quando se usam os métodos matemáticos, podem ocorrer dois tipos de erros ao ser comparados os modelos com a caso de estudo real de um problema físico. O primeiro, é o erro de discretização que é o resultado da errada execução das equações diferenças que governam o problema. Estes erros são identificados ao se comparar a solução numérica com outras soluções analíticas ou numéricas verificando-se se as equações foram corretamente resolvidas. O segundo tipo de erro é o erro de modelagem, ocorre devido ao uso inadequado das equações que representam o problema. Para que a modelagem seja aplicada de forma correta e retrate o acontecido no caso de estudo, necessita-se ter critério baseado na literatura científica, para selecionar os modelos que melhor representem o caso de estudo [47].

3.2 Modelo de Dinâmica dos Fluidos

A análise do escoamento multifásico na fornalha é representada como dois fases contínuas que interagem mediante o modelo Euleriano, as leis de conservação de massa e de quantidade de movimento são satisfeitas para cada fase individualmente. A figura 3.1 é o diagrama estrutural das leis de conservação usadas no modelo da dinâmica de fluidos, as equações serão explicadas posteriormente.

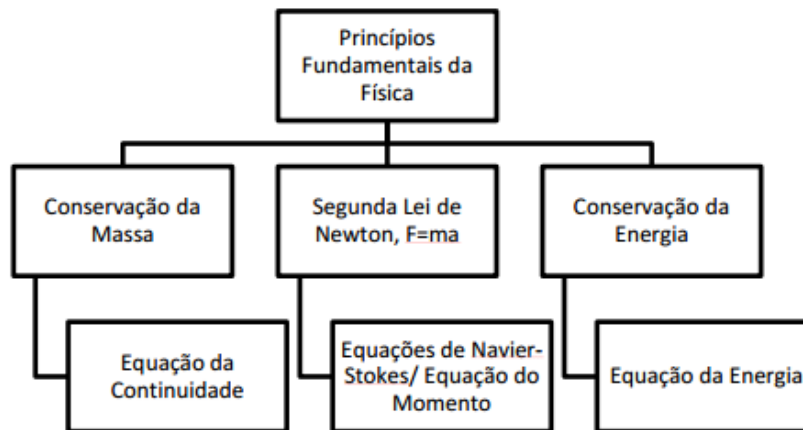


Figura 3.2. Equações de governo [28].

As equações que governam a dinâmica dos fluidos são mostradas a seguir.

3.2.1 Equação da conservação de continuidade

A equação 3.1 é a equação de conservação de continuidade para cada fase contínua: fase gasosa e o meio contínuo de cada espécie [36].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = S_m \quad (3.1)$$

Onde $\rho \bar{v}$ é o termo convectivo de cada meio contínuo.

S_m é o termo fonte de massa adicionada por cada espécie.

3.2.2 Equação da conservação de quantidade de movimento

A equação de conservação de quantidade de movimento [36,37], para um campo de referência inercial, descreve-se na equação 3.2.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \bar{g} + \bar{F} \quad (3.2)$$

Onde, p é a pressão estática.

$\rho \bar{g}$ é a força produzida pelo campo gravitacional.

\bar{F} representa as forças externas aplicadas no corpo.

$\bar{\tau}$ é o Tensor de Reynolds. Equação 3.3.

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{v} I \right] \quad (3.3)$$

Onde, μ é a viscosidade absoluta,

I é o tensor identidade,

O segundo termo do lado direito é o efeito de dilatação volumétrica.

Na equação 3.3 assume-se que o Tensor de Reynolds é proporcional ao gradiente das velocidades, ou chamado Fluido Newtoniano. A equação 3.2 se resolve com os modelos de turbulência os quais tem como objetivo resolver o forte acoplamento do campo de velocidades e suas não linearidades que ocorrem devido à uma escala de energia no escoamento que vai das grandes escalas até as viscosidades.

3.2.3 Equação da conservação da energia

Para descrever a conservação da energia pelo modelo Euleriano – Euleriano é usada a equação 3.4 [38, 39].

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)}_{\text{Estado transitorio}} + \underbrace{(\bar{v}(\rho E + p))}_{\text{termos convectivos}} = \left(\underbrace{k_{eff} \nabla T}_{\text{Conductividade}} - \sum_i \underbrace{(h_i \bar{J}_i)}_{\text{Difusão das especies}} + \underbrace{(\bar{\tau}_{eff} \cdot \bar{v})}_{\text{Dissipação viscosa}} \right) + \underbrace{S_h}_{\text{Termo fonte}} \quad (3.4)$$

Os três termos da equação que estão no parêntesis representam: O primeiro termo é a transferência de energia devido à condução, o segundo é devido a difusão das espécies e o terceiro é a energia de dissipação viscosa.

Onde, k_{eff} é a condutividade efetiva ($k + k_t$, onde k_t é a condutividade térmica da turbulência, definido pelo modelo de turbulência).

\bar{J}_i é a difusão do fluxo das espécies i .

S_h é o termo fonte o valor total é a soma da energia produzida pela reação química, mais a energia de radiação como fonte e mais outra fonte de energia adicionada dependendo do estudo.

Na equação 3.4, E é a energia igual a:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (3.5)$$

Difusão da energia: O termo de difusão térmica inclui o efeito da entalpia das espécies transportadas no meio, a difusão da energia é definida pela entalpia h e é calculada para um gás ideal com a equação 3.6.

$$h = \sum_i Y_i h_i \quad (3.6)$$

Onde, Y_i é a fração mássica das espécies i e h_i é:

$$h_i = \int_{T_{ref}}^T c_{p,i} dT \quad (3.7)$$

Onde, $T_{ref} = 298,15$ K.

Dissipação da energia: O termo de dissipação viscosa na equação da energia descreve a energia térmica criada pelos esforços cortantes viscosos τ no escoamento turbulento e é resolvida pela inclusão dos modelos de turbulência como modelo de fechamento da equação da energia.

Energia da reação química: A energia devida à reação química é somada como termo fonte na equação da energia S_h , e calcula-se com a equação 3.8.

$$S_{h,react} = - \sum_i \frac{h_i^0}{M_i} R_i \quad (3.8)$$

Onde, h_i^0 é a entalpia de formação da espécie i .

R_i é a taxa volumétrica de criação da espécie i .

M_i é a massa molecular da espécie i .

Transferência de energia por radiação: A transferência de energia devido à radiação também é incluída no termo fonte S_h . Neste caso de estudo a radiação é uma condição de contorno localizada nas paredes, tubos e no leito de combustível: o calor radiante gerado pela combustão é absorvido pelos tubos e pelas paredes da fornalha, onde se encontram os tubos de evaporação da água, do mesmo modo alguma parte do calor é absorvida pelo leito de combustível. A equação 3.9, mostra a energia absorvida pelos contornos difusivos e opacos.

$$-q_{r,w} = -\frac{\varepsilon_w}{2(2-\varepsilon_w)} (4n^2\sigma T^4 - G_W) \quad (3.9)$$

Onde, $q_{r,w}$ é o escoamento de energia radiativa incidente nas paredes de tubos ou no leito.

σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{-K}^4$).

G é a radiação incidente do material do contorno.

T é a temperatura no meio refrativo.

O subíndice r,w indica a direção do calor neste caso entrando na parede.

ε é a emissividade de cada material.

3.3 Modelos para escoamentos turbulentos

3.3.1 Escoamentos turbulentos

Reynolds propôs que os escoamentos turbulentos forem estudados com o princípio de que a velocidade instantânea pode ser decomposta em duas componentes, uma componente média e uma componente de flutuação [40], tal como se pode ver na Figura 3.3.

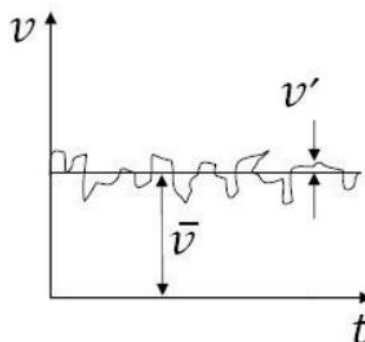


Figura 3.3. Representação esquemática da decomposição de Reynolds. [41]

Desta forma, a velocidade instantânea na direção i pode ser calculada com a equação 3.10.

$$v_i = \bar{v}_i + v'_i \quad (3.10)$$

Onde, que v_i corresponde à velocidade instantânea.

\bar{v}_i é a velocidade média.

v'_i é a velocidade flutuante.

Na maioria dos casos de estudo, os escoamentos turbulentos são definidos mediante o número de Reynolds calculado com a equação 3.11.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3.11)$$

Sendo, v a velocidade característica.

D é a comprimento característica.

μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

ρ é a massa específica do fluido.

3.3.2 Lei da parede

Experimentalmente se demonstrou que para estudar a camada limite detalhadamente, em problemas onde interagem fluidos com sólidos, a camada pode se dividir em basicamente três subcamadas internas: uma muito próxima da parede conhecida como subcamada viscosa, outra na parte externa, e uma camada intermediária na qual se interpõem o comportamento das duas camadas, próxima e externa da parede chamada camada logarítmica [36]. Figura 3.4.

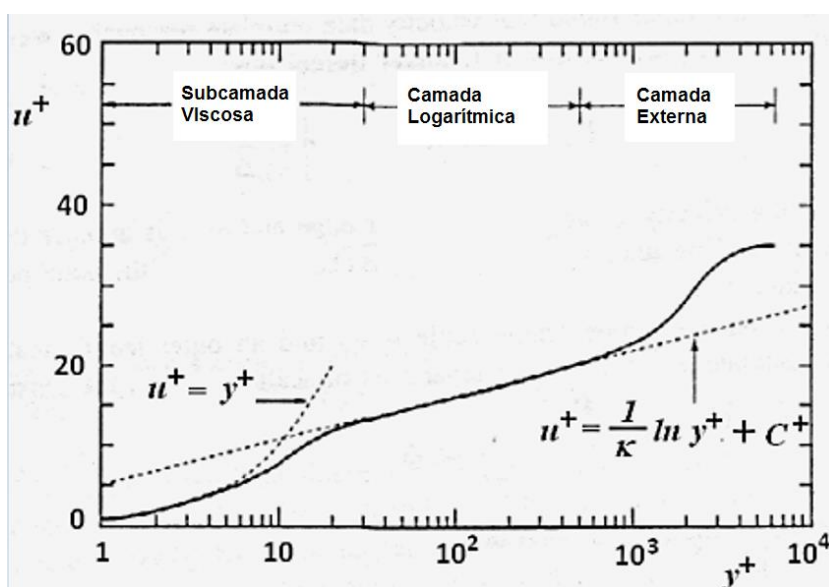


Figura 3.4. Perfil de velocidades na camada limite no escoamento perto das paredes usando variáveis adimensionais y^+u^+ . [41]

Na subcamada viscosa, a transferência de quantidade de movimento se dá principalmente devido ao efeito da viscosidade molecular, o seja, os esforços cortantes viscosos dominam esta região, tanto que na camada externa (região completamente turbulenta) os esforços cortantes de Reynolds são dominantes. Na camada intermedia tanto os esforços viscosos como os esforços de Reynolds são importantes [34,41].

A equação da lei da parede na capa externa está apresentada pela equação 3.12.

$$\frac{\bar{u}}{u_\tau} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{y u_\tau}{\nu} \right) + C^+ \quad (3.12)$$

Onde u_τ é a velocidade cortante.

k é conhecida como a constante de Kármán e é igual a aproximadamente 0,41.

C^+ é uma constante adimensional igual a 5 para paredes lisas.

Os termos de velocidade e comprimento adimensionais são:

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u_\tau} \quad y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \quad (3.13)$$

Os termos u^+ e y^+ são calculados para estabelecer se estão sendo considerados os efeitos viscosos turbulentos nas equações de governo do sistema.

Os modelos de turbulência usam os esforços cortantes de Reynolds para os cálculos localizando-se na subcamada externa da figura 3.4, o que quer dizer que estes modelos precisam resolver a lei da parede para ter valores mais exatos na interação do fluido com o sólido.

3.3.3 Cálculo do y^+

O y^+ relaciona o tamanho da malha com a zona de análise do escoamento turbulento (lei da parede), para valores de y^+ entre 0 e 80 o escoamento turbulento estará governado pelas forças viscosas (perto da parede), o qual garante uma análise mais real dos resultados, porém a malha será mais fina nesta zona aumentando o recurso computacional.

A seguinte equação é usada em escoamentos turbulentos para o cálculo do y^+ em relação às propriedades dinâmicas do escoamento e o tamanho de cada célula na malha. Equação 3.14.

$$y^+ = \frac{\rho C_\mu^{1/4} C k_p^{1/2} y_p}{\mu} \quad (3.14)$$

onde, k_p é a energia cinética turbulenta;

μ é a viscosidade cinética do escoamento;

C_μ é uma constante que depende do modelo de turbulência (para o modelo k- ϵ , $C_\mu = 0,0845$);

y_p é a mínima distância entre células na malha do modelo.

A energia cinética pode ser calculada com a equação 3.15.

$$k_{intlet} = \frac{3}{2}(U_{inlet}I)^2 \quad (3.15)$$

Onde, I é a intensidade de turbulência. Equação 3.16.

$$I = 0,16(Re_{DH})^{1/8} \quad (3.16)$$

3.3.4 Modelos de Turbulência

Para poder resolver as equações de conservação de Navier-Stokes foram criados modelos empíricos chamados modelos de turbulência, os quais se dividem em três grupos: os de primeira categoria que usam a suposição de Boussinesq, a segunda categoria usa a suposição das equações de Reynolds e a terceira categoria não se referem nas equações de Reynolds como são o modelo LES e DNS [34,41,42]. Os modelos de categoria 2 e 3 são modelos mais complexos que precisam maior recurso para ser resolvidos. Neste caso, vai ser explicados alguns dos modelos de categoria 2 os quais foram usados na modelagem da combustão de biomassa.

Modelo $k - \varepsilon$ Standard. Este modelo é aplicado para escoamentos internos, devido a que não é exato para gradientes adversos de pressão [40]. A equação da dissipação está dada por:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{\tau_{ij}} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \nu_T / \sigma_\varepsilon) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.17)$$

Onde os coeficientes de aproximação encontrados empiricamente são mostrados a continuação:

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

Modelo RNG $k - \varepsilon$. As equações de transporte e energia cinética de turbulência k e a taxa de dissipação de energia ε , são as mesmas que no modelo $k - \varepsilon$ standard, mas as constantes do modelo ou coeficientes de aproximação foram modificadas empiricamente para obter melhores resultados quando se apresentam gradientes adversos de pressão [44].

$$C_{\varepsilon 1} = 1.42 - f_n \quad f_\eta = \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{4.38} \right)}{\left(1 + \beta_{(RNG)} \eta^3 \right)} \quad \eta = \sqrt{\frac{\tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}{C_{\mu(RNG)} \varepsilon}} \quad (3.18)$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1.68, \quad C_{\mu(RNG)} = 0.085, \quad \beta_{(RNG)} = 0.012, \quad \sigma_{k,\varepsilon(RNG)} = 0.7179$$

Este modelo oferece resultados com maior precisão em escoamentos onde a curvatura das linhas de corrente e taxa de deformação são altas [44], por essa razão este modelo foi o selecionado no presente trabalho.

Modelo $k - \omega$. As equações de transporte da energia cinética turbulenta k e da frequência de turbulência ω são mostradas na equação 3.19 [42].

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha_1 \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta_1 \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_T \sigma_{\omega 1}) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (3.19)$$

Onde os coeficientes de aproximação são

$$\alpha_1 = 5/9, \quad \beta_1 = 0.075, \quad \sigma_{k1} = 1/2, \quad \sigma_{\omega 1} = 1/2, \quad \beta^* = 0.09$$

Este modelo é superior que o $k - \varepsilon$ standard para simular escoamentos com gradientes adversos de pressão. A principal desvantagem é a sensibilidade que apresentam para escoamentos laminares, longe das fronteiras sólidas [40].

Modelo *Baseline* (BSL). Este modelo mistura as melhores características do modelo $k - \varepsilon$ standard e o modelo $k - \omega$. Assim o modelo $k - \varepsilon$ transformado é mostrado na equação 3.20 [41].

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha_2 \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta_2 \omega^2 + \frac{2\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_T \sigma_{\omega 2}) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (3.20)$$

Onde os coeficientes de aproximação são:

$$\alpha_2 = 0.44, \quad \beta_2 = 0.0828, \quad \sigma_{k2} = 1, \quad \sigma_{\omega 2} = 0.856$$

Este modelo é aplicado para escoamentos com gradientes adversos da pressão com a vantagem de que os resultados não apresentam sensibilidade para escoamentos livres, mas estes são robustos computacionalmente [43].

3.4 Modelo de Meio Poroso

O modelo de meio poroso pode ser usado para escoamentos que passam através de leitos, de filtros de papel, de placas perfuradas, de distribuidores de fluxo e de bancos de tubos, o escoamento pode estar em uma ou várias fases [39]. No modelo de meio poroso a queda de pressão é determinada pela condição de entrada nas equações de *quantidade de movimento para meio poroso* e de *transferência de calor* as quais podem ser formuladas em equilíbrio térmico ou não, através da equação da *conservação da energia no meio poroso* [38].

Equação para meio poroso. O meio poroso é modelado pela adição de um termo fonte que representa uma fonte de momento nas equações de conservação de conservação de momento [39]. Esse termo fonte é composto por duas partes: um termo formado pelas perdas viscosas (parte esquerda da esquerda equação 3.21), e o outro termo representa as perdas inerciais (parte direita da equação) [38].

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (3.21)$$

Onde S_i é o termo fonte na dimensão i (x , y ou z) da equação do momento.

$|v|$ é o módulo da velocidade.

D e C são matrizes que representam os coeficientes de perdas viscosas e inercial respetivamente.

No caso do meio poroso homogêneo o termo fonte de momento e calculado com a equação 3.22.

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (3.22)$$

Onde, α e C_2 são coeficientes que representam a resistência do fluido através do leito e se conhecem como permeabilidade e fator da resistência inercial respetivamente [39].

Equações do modelo de equilíbrio térmico. A zona sólida do leito interage unicamente com o escoamento a partir da transferência de calor. As equações de conservação de energia são resolvidas separadamente para a fase gasosa e sólida. A equação (3.23) mostra a conservação da energia para a fase gasosa [38].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma\rho_f E_f) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho_f E_f + p)) = \nabla \cdot (\gamma k_f \nabla T_f - (\sum i h_i J_i) + (\bar{v} \cdot \vec{v})) + S_f^h + h_{fs} A_{fs} (T_f - T_s) \quad (3.23)$$

E a equação 3.24 é a equação da conservação da energia para a zona sólida.

$$\frac{\partial}{\partial t}((1 - \gamma)\rho_s E_s) = \nabla \cdot ((1 - \gamma)k_s \nabla T_s) + S_s^h + h_{fs} A_{fs} (T_f - T_s) \quad (3.24)$$

Onde, E_f = Energia total do escoamento.

E_s = Energia total do meio sólido.

ρ_f = densidade do escoamento.

ρ_s = densidade do meio sólido.

γ = porosidade do leito.

k_f = Condutividade térmica do escoamento.

k_s = Condutividade térmica do meio sólido.

k_{fs} = Coeficiente de transferência de calor para o escoamento / interface sólido.

A_{fs} = Densidade da área interfacial.

T_f = Temperatura do escoamento.

T_s = Temperatura do sólido do meio.

S_f^h = Termo fonte da entalpia do escoamento.

S_s^h = Termo fonte da entalpia do sólido.

Escoamento através de um leito poroso. A equação mais usada para calcular a queda de pressão em um reator de leito de meio poroso, é a equação de Ergun (equação 3.25) [45].

$$\frac{dP}{dZ} = - \frac{\rho u}{\rho D_p} \left(\frac{1-\gamma}{\gamma^3} \right) \left[\frac{150(1-\gamma)\mu}{D_p} + 1,75\rho u \right] \quad (3.25)$$

Onde, dP = queda de pressão.

γ = porosidade (volume de vazios/volume total do leito).

$1 - \gamma =$ (volume de sólido/volume total do leito).

$D_p =$ Diâmetro da partícula no leito.

$\mu =$ viscosidade do gás passando através do leito.

$z =$ posição ao longo do leito.

$\rho u =$ velocidade mássica superficial.

A equação de Ergun é utilizada para caracterizar o leito do combustível como leito poroso.

3.5 Modelo de Transporte de Espécies e Reações Químicas.

O modelo de transporte de espécies e reações químicas é usado para modelar a combustão de combustíveis sólidos em volumes fechados como as fornalhas das caldeiras onde acontecem os seguintes processos [39].

- Mistura e transporte de espécies químicas.
- Difusão e convecção das espécies.
- Transferência de calor: condução, convecção e radiação de cada espécie.
- Termos fontes das reações de cada espécie.
- Múltiplas reações químicas simultâneas.
- As reações químicas podem ocorrer em volumes, paredes ou partículas.

No presente trabalho este modelo foi aplicado na fornalha, na fase gasosa, onde as espécies liberadas no leito são transportadas na fase contínua, e algumas das espécies, como os voláteis, reagem com o oxigênio.

3.5.1 Equação de transporte de espécies

Neste modelo, a equação da continuidade para as espécies químicas tem a seguinte forma geral (equação 3.26), a qual calcula a fração mássica para cada espécie Y_i , junto com os processos de convecção e difusão na espécie (i) [38.39].

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i)}_{\text{Termo transitorio}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i)}_{\text{Termo convectivo}} = \underbrace{\nabla \cdot \bar{J}_i}_{\text{Difusão das espécies}} + \underbrace{R_i}_{\text{Produção das espécies nas reações químicas}} + \underbrace{S_i}_{\text{Termo fonte das espécies}} \quad (3.26)$$

Onde, R_i é a taxa neta de produção de espécies pela reação química.

S_i é a taxa de criação ou destruição pela adição de um termo fonte.

J_i é a difusão da espécie i , que surge devido a gradientes de concentração e temperatura.

Difusão das espécies: Para modelar a difusão das espécies devido a gradientes de concentração, é usada uma equação chamada como lei de Fick, e para escoamentos turbulentos pode ser apresentada como a equação 3.27 [39].

$$\bar{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (3.27)$$

Onde Sc_t é o número de Schmidt usado em escoamentos turbulentos ($Sc_t=0,7$).

μ_t é a viscosidade turbulenta.

D_t é o coeficiente de difusividade turbulento.

3.5.2 Taxa de produção das espécies devido à reação química

A taxa de produção ou de consumo das espécies devido as reações na fase gasosa, são apresentadas como termo fonte R_i em escoamentos turbulentos e podem ser calculadas através de três modelos [34,39], os quais são descritos a continuação.

Modelo de taxa finita laminar: Os efeitos das flutuações turbulentas são ignorados e as taxas das reações são determinadas pela expressão cinética de Arrhenius.

Modelo Eddy-dissipation: As taxas das reações são controladas pela turbulência, assim os cálculos da cinética química de Arrhenius podem ser desconsiderados.

Modelo Eddy-dissipation-concept (EDC): Neste modelo a cinética química de Arrhenius é incorporada em detalhe para as chamas turbulentas. Os cálculos com este modelo precisam maior recurso computacional devido a sua complexidade.

Para a modelagem da combustão de biomassa em fornalhas é usado o modelo Eddy-dissipation, cujos os resultados mostram adequadamente os comportamentos na interação entre as chamas turbulentas formadas na fornalha com a taxa de produção das espécies, o que quer dizer, que a produção das espécies depende unicamente da mistura do combustível com o oxidante, além disso, o uso de taxas cinéticas detalhadas de outros modelos avançados, requer maior recurso computacional pela discretização no tempo destas variáveis, deste modo este modelo representa

uma produção mais rápida das espécies e um passo de tempo menor, as quais dependem da mistura entre os materiais.

3.5.3 Modelo Eddy-dissipation

Este é um modelo empírico matemático aplicado para a maioria dos combustíveis o quais são queimados rapidamente e geralmente a taxa de reação é controlada pela mistura provocada pela turbulência, por exemplo, as chamas não pré-misturadas, onde a turbulência se encarrega de misturar o combustível com o oxidante (o ar) nas zonas de reação. A taxa líquida de produção das espécies i devido á reação r é calculada com a equação 3.28 [39].

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_i Y_i}{\sum_j v''_{j,r} M_{w,j}} \quad (3.28)$$

Onde, $v'_{i,r}$ é o coeficiente estequiométrico para o reagente i na reação r .

$v''_{i,r}$ é o coeficiente estequiométrico para o produto i da reação r .

Y_i é a fração mássica de cada espécie.

$M_{w,i}$ é o peso molecular da espécie i .

A e B são constantes empírica igual a 4 e a 5 respetivamente, determinadas como taxas cinéticas para alguns tipos de combustível.

Note-se que a taxa química da reação é governada pela tempo de escala turbulenta (ε/k).

Em outros modelos empíricos desenvolvidos a taxa cinética de espécies é controlada pela expressão de Arrhenius (equação 3.29) [34] [46].

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{\left(\frac{-E_r}{RT}\right)} \quad (3.29)$$

Onde, A_r é o fator exponencial.

β_r é um expoente de temperatura (adimensional).

E_r é a energia de ativação para a reação r (J/kmol)

R é a constante universal (J/kmol-K).

Para o presente trabalho foi usado o modelo Eddy-Dissipation para calcular as taxas de espécies produzidas pela queima dos voláteis, usando o princípio Euleriano para a interação das equações de conservação na mistura das espécies.

3.6 Modelo de radiação

Este modelo é aplicado para, transferência de calor radiativo produzido pelas chamas, aquecimento ou esfriamento entre superfícies, acoplamento das transferências de calor radiação, convecção e condução, entre outras. A radiação é incluída quando o fluxo de calor radiativo (equação 3.30) é maior comparado com a taxa de transferência de calor por convecção e condução, tipicamente isto ocorre a altas temperaturas [39].

$$Q_{rad} = \sigma(T_{max}^4 - T_{min}^4) \quad (3.30)$$

3.6.1 Equação de transferência radiativa

A equação de transferência radiativa é calculada com a equação 3.31 [39].

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \alpha_s)I(\vec{r} + \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r} + \vec{s}') \varphi(\vec{s} + \vec{s}') d\Omega' \quad (3.31)$$

onde, \vec{r} = vetor posição.

\vec{s} = Vetor direção.

\vec{s}' = Vetor direção espalhamento.

s = comprimento do percurso.

α = coeficiente de absorção.

n = índice de refração.

σ_s = coeficiente de espalhamento.

σ Constante Stefan-Boltzmann ($5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{-K}^4$).

I = intensidade de radiação, a qual depende da posição \vec{r} e a direção \vec{s} .

T = temperatura local.

φ = função de fase.

Ω' = ângulo do sólido.

$(a + \alpha_s)s$ é a espessura ótica ou opacidade do meio.

Na tabela 3.1 se encontra as vantagens e as limitações dos modelos de radiação usados em CFD, se pode sinalar que os modelos são desenvolvidos e melhorados sequencialmente.

Tabela 3.1 Vantagens e limitações dos Modelos de radiação [39].

| Modelo de radiação | Vantagens | Limitações |
|---|---|---|
| -Modelo de radiação de transferência discreta (DTRM): | Modelo mais simples | Assume que todas as superfícies são difusivas. O efeito de dispersão não é incluído. A aplicação tem em conta a radiação Gray |
| -Modelo de radiação P-1. | Pouca demanda do recurso computacional. Inclui o modelo de dispersão Trabalha bem para temperaturas altas como a combustão. Pode ser aplicado a geometrias complicadas | Assume que todas as superfícies são difusivas. Pode ser usada para radiação Gray. Tende a exagerar os fluxos radiativos em fontes de calor localizados. |
| -Modelo de radiação Roseland | Não inclui uma equação extra para o transporte da radiação incidente. É mais rápido que o modelo P-1. Exige menor recurso computacional | É usado unicamente para meio ótico. |
| -Modelo de radiação Ordenada discreta (DO) | Funciona com vários tipos de espessuras ópticas. Tem distintos usos desde radiação entre superfícies até problemas de combustão. O custo computacional é moderado dependendo do problema. | Seu uso é limitado para radiação Gray. Em alguns casos pode consumir muito recurso computacional. |
| -Modelo de radiação Superfície – superfície (S2S) | É usado para modelagens de transferência radiativa em sistemas fechados. Pode ser mais rápido que o modelo DTRM e o modelo DO | Não é sempre eficiente, e seu uso computacional se incrementa com o número de superfícies do problema. Assume todas as superfícies difusivas Assume radiação Gray Seu uso é restrito com algumas condições de entorno e simplificação do modelo. |

Para a modelagem da combustão de biomassa em leito existem dois modelos de radiação que podem ser aplicados, estes são o modelo P-1 e o DO, os dois apresentam resultados satisfatórios na transferência de calor entre superfícies, mas o modelo P-1 pode ter maiores erros de precisão quando as fontes de calor são localizadas. Deste modo, neste trabalho foi usado o modelo DO já que as fontes de calor produzidas pela combustão da biomassa se concentrarão no leito, embora este modelo requeira maior recurso computacional que o P-1.

3.6.2 Modelo Discrete Ordinates (DO)

Este modelo resolve a equação de transferência radiativa (equação 3.30) para um número finito de ângulos sólidos discretos, cada um deles é associado com um vetor de direção \vec{s} fixo no sistema cartesiano global. O modelo DO transforma em uma equação de transporte a intensidade de radiação no sistema de coordenadas global de acordo com o vetor de direção.

4. METODOLOGIA DA MODELAGEM COM CFD DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA EM LEITO PARA PEQUENHAS CALDEIRAS

A metodologia apresentada na figura 4.1 foi proposta para a modelagem da combustão de qualquer tipo de biomassa, porém unicamente para queima em leito sobre grelha fixa. Para o desenvolvimento matemático desta metodologia foi usado o CFD e o método de volumes finitos.

A metodologia inicia com a caracterização da biomassa e da caldeira, nesta etapa se determina o tipo de biomassa e as dimensões e funcionamento da caldeira. Seguidamente se caracteriza o leito de combustível como meio poroso, para isso foi necessário fazer testes na caldeira do estudo. O seguinte passo é fazer uma estratégia da combustão tendo como referência artigos e documentos científicos, a metodologia feita neste trabalho é única devido a que cada autor afronta a combustão de uma forma diferente. Depois foi realizado a análise CFD, nesta etapa foi desenvolvida a modelagem para o caso de estudo. Finalmente se analisam os resultados e se realizam comparações entre os cenários de estudo. Quando se tem as ferramentas necessárias é recomendável fazer a validação experimental para confirmar os resultados da modelagem.

Os processos da metodologia propostos para a combustão da biomassa em grelha são desenvolvidos neste trabalho, e os resultados se apresentam no capítulo 5, em seguida serão descritos cada um dos processos:

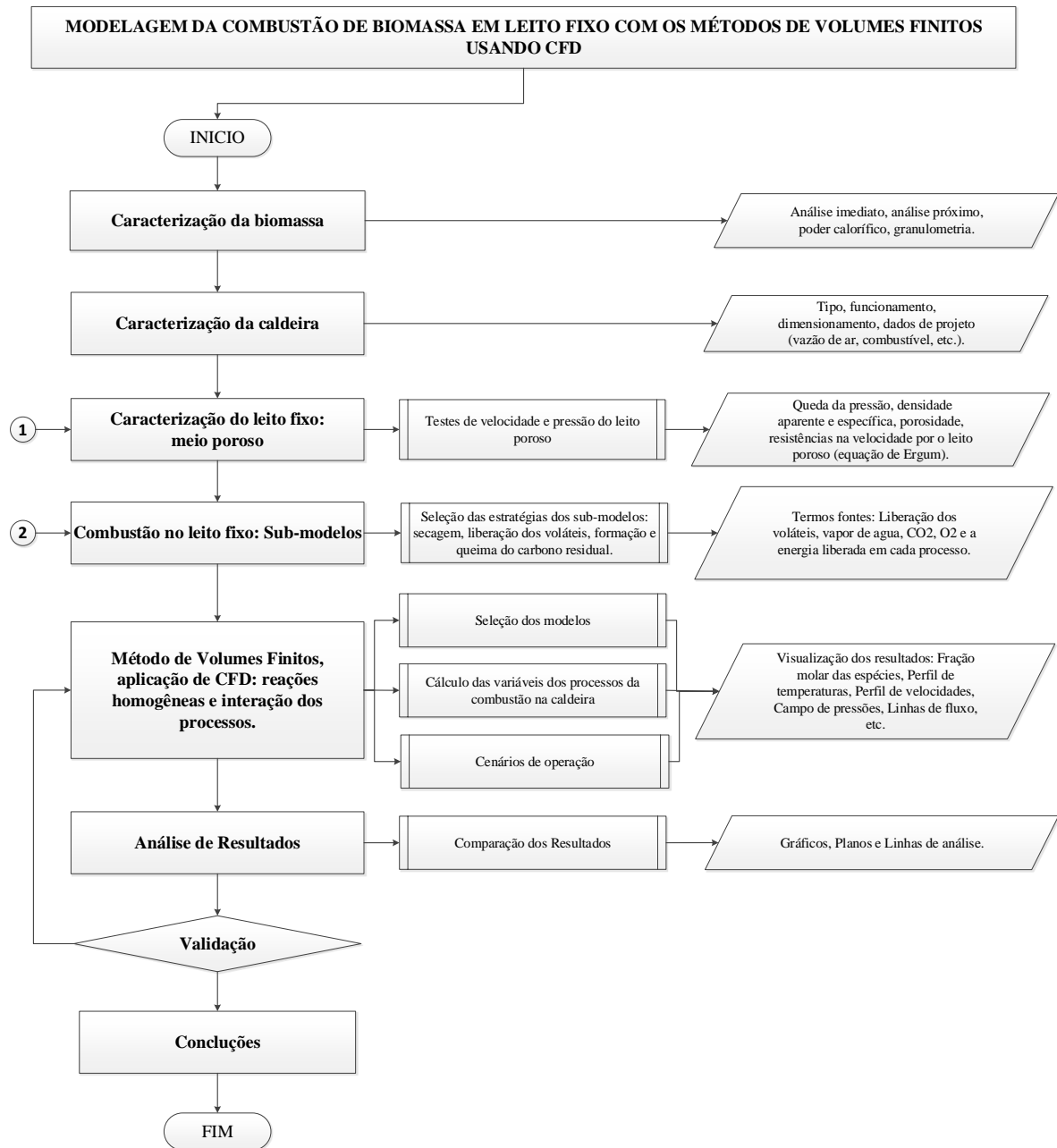


Figura 4.1 Diagrama de fluxo da metodologia da modelagem da combustão de biomassa em leito fixo com os métodos de volumes finitos, usando CFD.

4.1 Caracterização da Biomassa

Para a caracterização da biomassa, teve-se em consideração a medição dos parâmetros físico-químicos como a análise elementar, análise imediata e o poder calorífico, para conhecer a capacidade energética da biomassa. A caracterização da biomassa são dados de entrada da modelagem.

A biomassa selecionada neste estudo foi a madeira, e os testes de caracterização foram feitos no laboratório do NEST, que conta com os equipamentos necessários para realizar as medições seguindo as normativas ASTM vigentes (ver tabela 2.1), O anexo 1 contém as fotos dos equipamentos do laboratório.

A madeira que chega ao laboratório tem que ser pré-tratada como se vê na figura 4.2, ficando homogênea em suas dimensões, devido ao requerimento dos equipamentos de conversão de energia.



Figura 4.2. Madeira pré-tratada na caldeira de estudo no laboratório do NEST.

4.2 Caracterização da Caldeira

O processo a seguir é a caracterização da caldeira, para isto considera-se as seguintes características: o tipo da caldeira, o funcionamento, o dimensionamento, o tipo de grelha e os dados de projeto como: a vazão do ar primário e secundário, a vazão do combustível, a temperatura do ar de entrada, a temperatura dos gases de exaustão na chaminé, material das paredes na fornalha e outras. Estes dados são algumas das condições de entrada e de contorno da modelagem.

Para caracterizar a caldeira que se encontra no laboratório (Figura 4.3), a qual é uma pequena caldeira mista que foi projetada para diferentes pesquisas de combustão do NEST, se mediu o interior desta: a câmara de combustão, o duto de ar, a entrada de ar secundário, o duto de saída dos gases de exaustão, entre outros (no anexo 2 se mostram o desenho da caldeira). Também

foi medida com um anemômetro digital a vazão de ar primário e secundário de forma experimental.

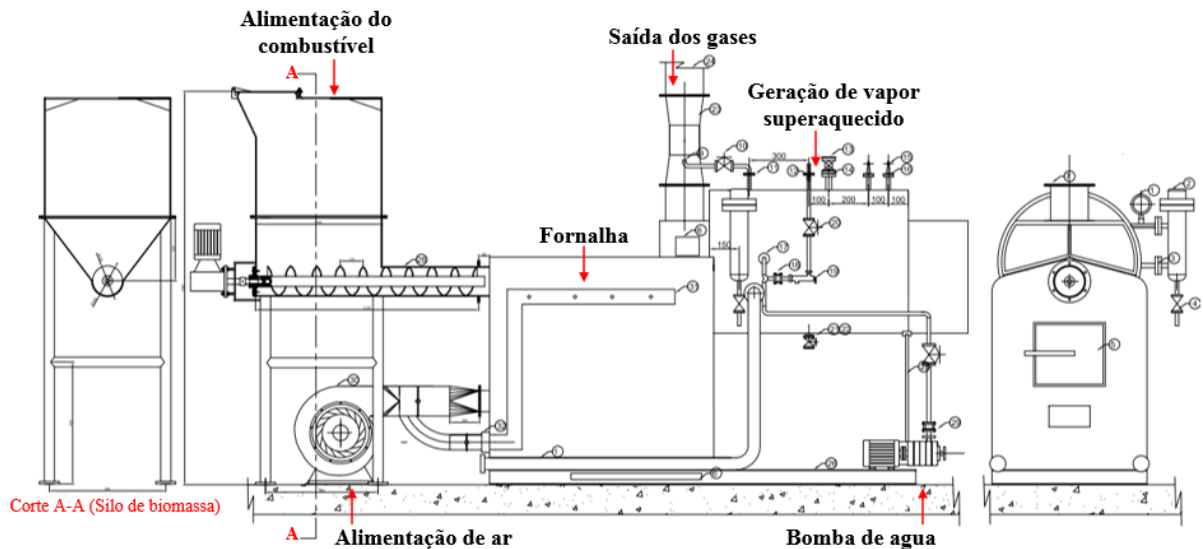


Figura 4.3. Esquema da caldeira de testes do NEST.

O sistema de distribuição de ar desenhado nesta caldeira se conforma por um ventilador que alimenta o ar à fornalha, porém o duto de entrada de ar é dividido em dois dutos, o primeiro é direcionado a fornalha a 40 cm da grelha fixa no centro da camada de combustível, o segundo duto é mais pequeno e dirige o fluxo de ar na parte superior da fornalha, em cima do leito de madeira. As especificações da caldeira foram obtidas pelo fabricante AG-Therm e são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Características de projeto da caldeira subministrados pela AG-Therm.

| Características Técnicas da Caldeira de Estudo | |
|---|------------------------|
| Combustível | Biomassa |
| Pressão Máxima de Trabalho | 21 kgf/cm ² |
| Superfície de Aquecimento | |
| Fornalha | 6 m ² |
| Primeiro passe | 0,7 m ² |
| Segundo passe | 2,4 m ² |
| Total | 6,7 m ² |
| Área da grelha | 0,63 m ² |
| Volume da câmara de combustão | 0,65 m ³ |

A combustão acontece na fornalha (biomassa + oxigênio conteúdo no ar) liberando calor, alcançando temperaturas de 1200 °C (Temperatura de projeto), o fluxo de calor transfere a energia ao feixo de tubos nas paredes da fornalha, onde a água é evaporada. A fornalha conta

com entrada de ar primário posicionada em um costado dela acima da grelha como se pode ver na figura 4.4, e a entrada de ar secundário se encontra posicionada acima do leito do combustível. Os gases de exaustão produzidos pela combustão (800 °C saída da fornalha) são transportados por tubos dentro de um tanque de água e vapor transferindo o calor, neste tanque o vapor é superaquecido. Finalmente os gases saem pela chaminé e o vapor de água superaquecido é transportado por tubos isolados termicamente à zona de conversão a energia elétrica.

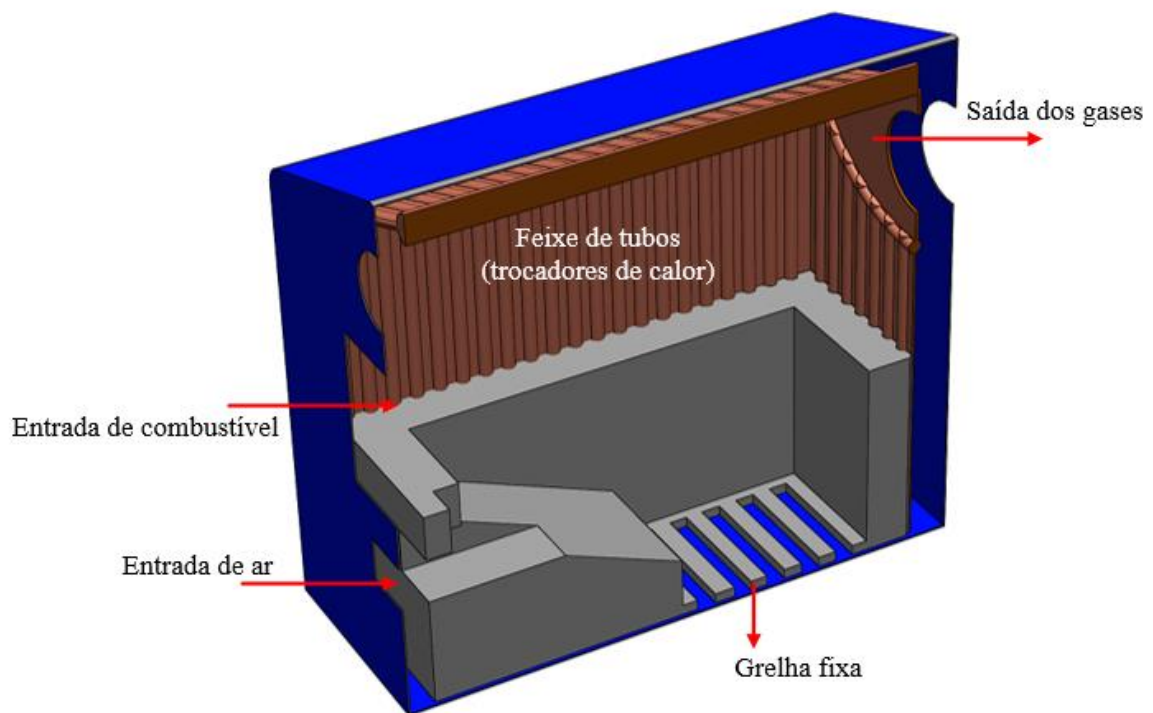


Figura 4.4. Fotos da fornalha da caldeira de estudo.

A caldeira foi fabricada pela empresa AG-Therm, utilizando tubos de aço ASTM A-178, com coletor superior de diâmetro de 200 mm e coletores inferiores com diâmetro de 100 mm. As paredes são integralmente radiantes em tubos de aço de 12,7 mm DIN – 2458, aletadas com

chapa de aço de 6,35 mm soldadas eletricamente por processo contínuo. A porta de alimentação de biomassa tem as dimensões: 200 x 250 mm, e é isolada com concreto refratário [53].

Alguns cálculos estequiométricos foram feitos para corroborar a informação de projeto da caldeira (anexo 4).

4.3 Caracterização do Leito de Combustível: Meio Poroso

Na caracterização do leito do combustível como meio poroso, se considerou a queda de pressão dentro da camada de combustível desde a grelha até o limite do leito, a pressão foi calculada por meio de medições. Nos testes mediu-se a velocidade com relação à pressão em diferentes pontos do leito de madeira. A queda de pressão e usada na equação de Ergun (equação 3.24) para calcular os fatores da resistência viscosa e inercial do meio poroso [39]. Além disso, é medida a densidade aparente e a específica da biomassa para calcular a porosidade do meio poroso.

Neste estudo, a vazão e a pressão do ar foram medidas de forma experimental antes, depois e em diferentes pontos do leito de combustível, utilizando o anemômetro e o barômetro digital respectivamente do laboratório do NEST, para calcular as resistências produzidas na vazão de ar no leito que caracterizam o meio poroso na modelagem, os dados obtidos são calculados usando a equação de Ergun. A foto da figura 4.6 mostra uma das medições da vazão na entrada de ar (Anexo 3).



Figura 4.5. Medição da vazão do ar primário na fornalha com um anemômetro.

4.4 Combustão do Leito de Biomassa

Geralmente a modelagem da combustão no leito fixo é dividida em 4 submodelos: secagem, liberação dos voláteis, formação e queima do carbono residual, existem diferentes técnicas matemáticas dependendo da estratégia selecionada para resolver os problemas específicos de cada autor. Para o cálculo dos termos fontes (voláteis, H₂O vapor, CO₂ e O₂) e a energia que é liberada em cada submodelo, são usados por modelos matemáticos especiais, a dinâmica de fluidos usa o método de volumes finitos para sua análise matemática, porém estudos avançados usam modelos próprios que são introduzidos a softwares especializados que resolvem as equações de governo.

Os termos fontes calculados interagem com a fase gasosa por meio das equações de conservação (equação de energia e de continuidade: transporte de espécies) resolvidas com CFD. Os termos fonte de cada espécie são adicionados na equação de transporte como uma taxa de produção, e o termo fonte de energia é integrado como um fluxo de calor na equação da energia.

No presente estudo, a estratégia selecionada para a modelagem dos submodelos no leito fixo (a secagem, a liberação dos voláteis e a queima do carbono residual), foi calcular os termos fontes das espécies e a energia liberada, mediante o balanço de massa e de energia. O cálculo foi feito com as seguintes equações:

4.4.1 Termo fonte das espécies

A equação 4.1 foi usada para o cálculo dos termos fontes das espécies, as quais são produzidas pelas reações no leito fixo.

$$R_{\text{reação}} \left[\frac{kg}{m^3 \cdot s} \right] = \frac{m_{\text{especie}} \left[\frac{kg_{\text{especie}}}{kg_{\text{madeira}}} \right] * \dot{q}_{\text{mad}} \left[\frac{kg}{seg} \right]}{V_{\text{cam}} [m^3]} \quad (4.1)$$

Onde, R_{vol} é a taxa de liberação ou consumo das espécies.

m_{especie} é a fração mássica da espécie.

\dot{q}_{mad} é a vazão de combustível.

V_{cam} é o volume do leito.

4.4.2 Termo fonte de energia

A energia total liberada no processo da combustão da biomassa no leito (E) pode ser dividida em duas partes: a primeira é a energia dos reagentes (E_{reag}), a qual representa a energia liberada ou consumida, e é calculada com o delta das entalpias de cada subprocesso (Equação 4.3); e a segunda ($E_{especies}$) é a energia consumida pelas espécies para sua formação, dependendo da temperatura (Equação 4.4). O termo de energia total liberada na combustão (E) é calculado somando as energias de reagentes e de espécies, equação 4.2.

$$E \left[\frac{W}{m^3} \right] = \frac{(E_{reagentes} \left[\frac{J}{s} \right] - E_{especies} \left[\frac{J}{s} \right])}{V_{mad} [m^3]} \quad (4.2)$$

Onde $E_{reagente}$ e $E_{especie}$ são:

$$E_{reagentes} \left[\frac{kJ}{s} \right] = \sum_{i=1}^3 m_{especie(i)} \left[\frac{kg_{especie(i)}}{kg_{mad}} \right] * \dot{q}_{mad} \left[\frac{kg}{seg} \right] * \left(\Delta h_i \left[\frac{kJ}{kg_{especie(i)}} \right] \right) \quad (4.3)$$

$$E_{especies} \left[\frac{kJ}{s} \right] = \sum_{i=1}^3 m_{especie(i)} \left[\frac{kg_{especie(i)}}{kg_{mad}} \right] * \dot{q}_{mad} \left[\frac{kg}{seg} \right] * \left(Cp_i \left[\frac{kJ}{kmol(i) \cdot K} \right] * \Delta T [K] \right) \quad (4.4)$$

onde o índice i representa cada espécie dos processos: $i=1$ é a secagem, $i=2$ é a liberação dos voláteis e $i=3$ é a queima do carbono residual. Na etapa do carbono residual é consumida uma fração de oxigênio.

Os valores da entalpia para a secagem, liberação dos voláteis e queima do carbono residual e o C_p da H_2O , Voláteis e do CF, foram consultados na literatura científica e verificados com tabelas termodinâmicas (tabela 4.2).

Tabela 4.2 Dados cinéticos e térmicos dos sub - processos da combustão.

| Processos da combustão | $\Delta h \left(\frac{kJ}{kg} \right)$ | Espécie | * C_p (J/kg*K) | Referencia |
|------------------------|---|------------------|------------------|------------|
| Secagem | -2256,90 | H ₂ O | 1380 | 34 |
| Liberação de Vol | -411,10 | Voláteis | 1100 | 34 |
| Oxidação do CF | 9210,83 | Carbono Fixo | 1250 | 48 |

4.4.3 Submodelos da combustão da madeira em leito fixo

A descrição dos submodelos da combustão da madeira para a modelagem do presente estudo é mostrada a seguir:

Secagem: A etapa de secagem é modelada em duas partes que acontecem simultaneamente, a primeira é a liberação da água em forma de vapor para os gases de exaustão, a segunda é o consumo de energia pela madeira devido ao processo de transformação de água em vapor. Ver figura 4.6. A quantidade de vapor liberado e a energia consumida neste processo foram calculadas como termo fonte com a equação 4.1 e 4.2 respectivamente.

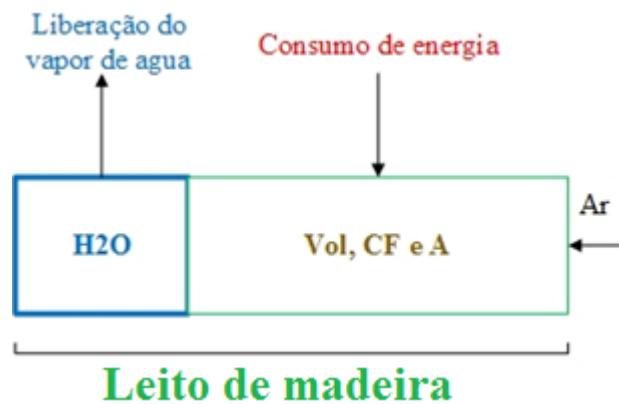


Figura 4.6 Esquema da secagem de madeira na modelagem

Liberação de voláteis: Igual à secagem, esta etapa é simulada em duas partes como são, o cálculo da quantidade de voláteis liberados e a energia que se precisa para efetuar este processo (figura 4.7).

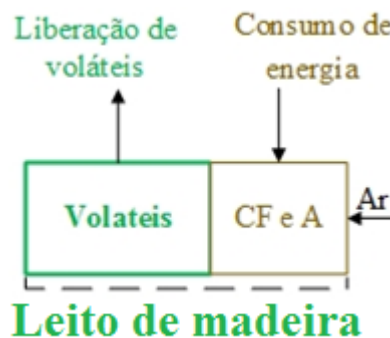


Figura 4.7 Esquema da liberação de voláteis na modelagem

Queima do carbono residual: A maior energia aportada na combustão é dada por este processo. Para o presente estudo considerou-se a reação química mostrada na figura 4.8, deste

modo são calculados os seguintes três termos fontes: o oxigênio e o carbono fixo consumido e o CO₂ liberado. Foi utilizado o balanço de massa e a equação 4.1 para estes cálculos.

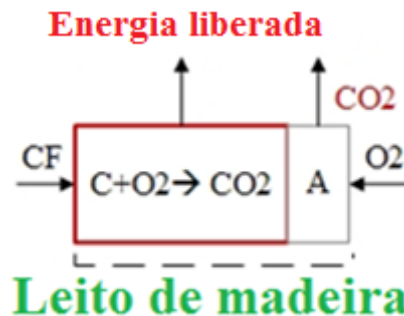


Figura 4.8 Esquema da queima do char na modelagem

4.5 Aplicativa da Dinâmica dos Fluidos Computacional CFD na combustão de madeira

Para o presente estudo a combustão da madeira no leito fixo ocorre em duas zonas (figura 4.9), a primeira inclui as reações descritas anteriormente dentro do leito e a segunda ocorre na fornalha; para isso os termos fontes calculados na modelagem da combustão no leito são acoplados à fase gasosa onde se desenvolve a queima dos voláteis.

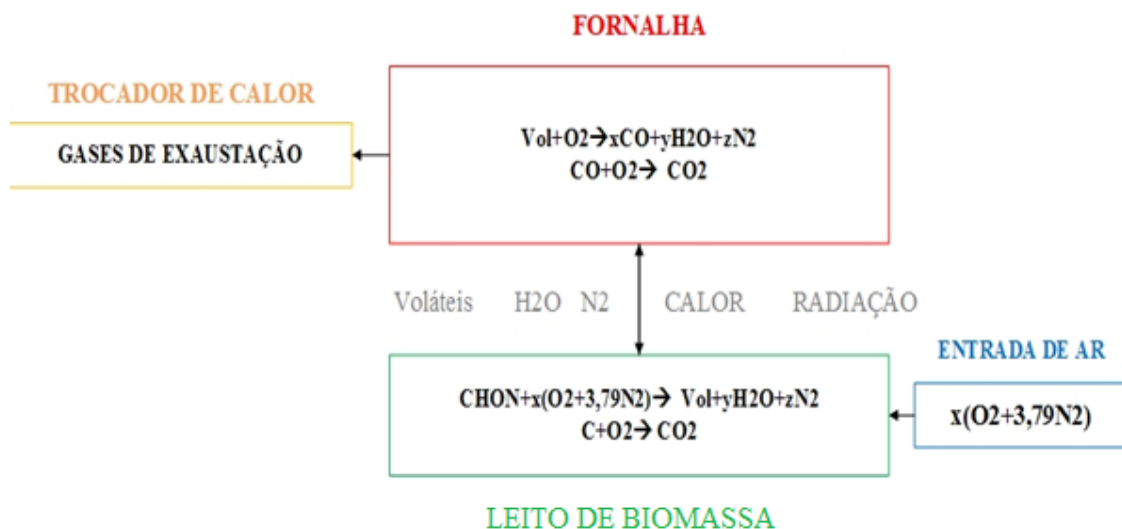


Figura 4.9 Esquema global da estratégia de combustão para a modelagem.

Na fornalha foram desenvolvidas as reações homogêneas da combustão da madeira, a queima dos voláteis é o processo de maior interesse nesta etapa para a modelagem da combustão. Além disso, foram resolvidas as equações de conservação (momento e continuidade) dos fluidos,

utilizando modelos matemáticos que descrevem o comportamento dos gases de combustão dentro da fornalha, os quais são discretizados por meio da Dinâmica Computacional de Fluidos (CFD), o qual para o desenvolvimento deste método matemático foi proposta uma metodologia que vai ser explicada detalhadamente no próximo capítulo.

Para a análise dos resultados do presente estudo levou-se a comparação com outros trabalhos da modelagem da combustão de madeira em leito; além disso, foi proposto um cenário de operação variando a vazão de ar primário e secundário. Posteriormente é recomendável fazer a validação experimental da modelagem, neste trabalho foi apresentada uma validação preliminar, o qual dá um indício de que os resultados obtidos são razoáveis e coerentes.

A descrição da combustão feita neste capítulo foi adaptada de vários autores científicos, mas a forma de abordar a combustão é diferente a outros autores que modelam a combustão de biomassa em leito. A seguir é descrita a modelagem da combustão de madeira no leito usada neste trabalho.

5. MODELAGEM COM CFD DA COMBUSTÃO DE MADEIRA EM LEITO

Neste capítulo é mostrada a metodologia para a modelagem da combustão numa caldeira com grelha fixa, a partir da madeira pré-tratada. Em primeiro lugar se mediu o volume interno da fornalha (geometria do modelo); também se estabeleceu as condições de contorno da modelagem. Posteriormente, se projetou a malha limitando a zona de análise. Depois segue o processamento das variáveis com a modelagem com CFD, o qual resolve as equações de governo nos volumes criados dentro da caldeira. As equações resolvem-se por meio dos seguintes modelos matemáticos: Modelo de Dinâmica de fluidos (modelo de turbulência), Modelo de Meio Poroso, Modelo de Transporte de Espécies e Modelo de Radiação. Finalmente a metodologia sugere fazer a validação preliminar, comparando os resultados com medições simples ou com a literatura, analisando os resultados da modelagem.

Para o presente estudo foi proposta uma metodologia (Figura 5.1) que permite modelar a combustão de biomassa em uma caldeira de grelha fixa, determinando as variáveis involucradas no processo. A modelagem foi feita com CFD, deste modo as equações de conservação resolvem-se com o Método de Volumes Finitos. A metodologia é explicada mediante um fluxograma na Figura 5.1, e o desenvolvimento da metodologia para o caso de estudo, se mostra nos seguintes capítulos.

As simulações foram realizadas no software ANSYS Fluent® V.14, usando um computador ASUS®, com 8 Gb de memória RAM e 4 processadores Core I7. O tempo estimado no processamento foi entre 17 a 45 horas dependendo da complexidade da simulação.

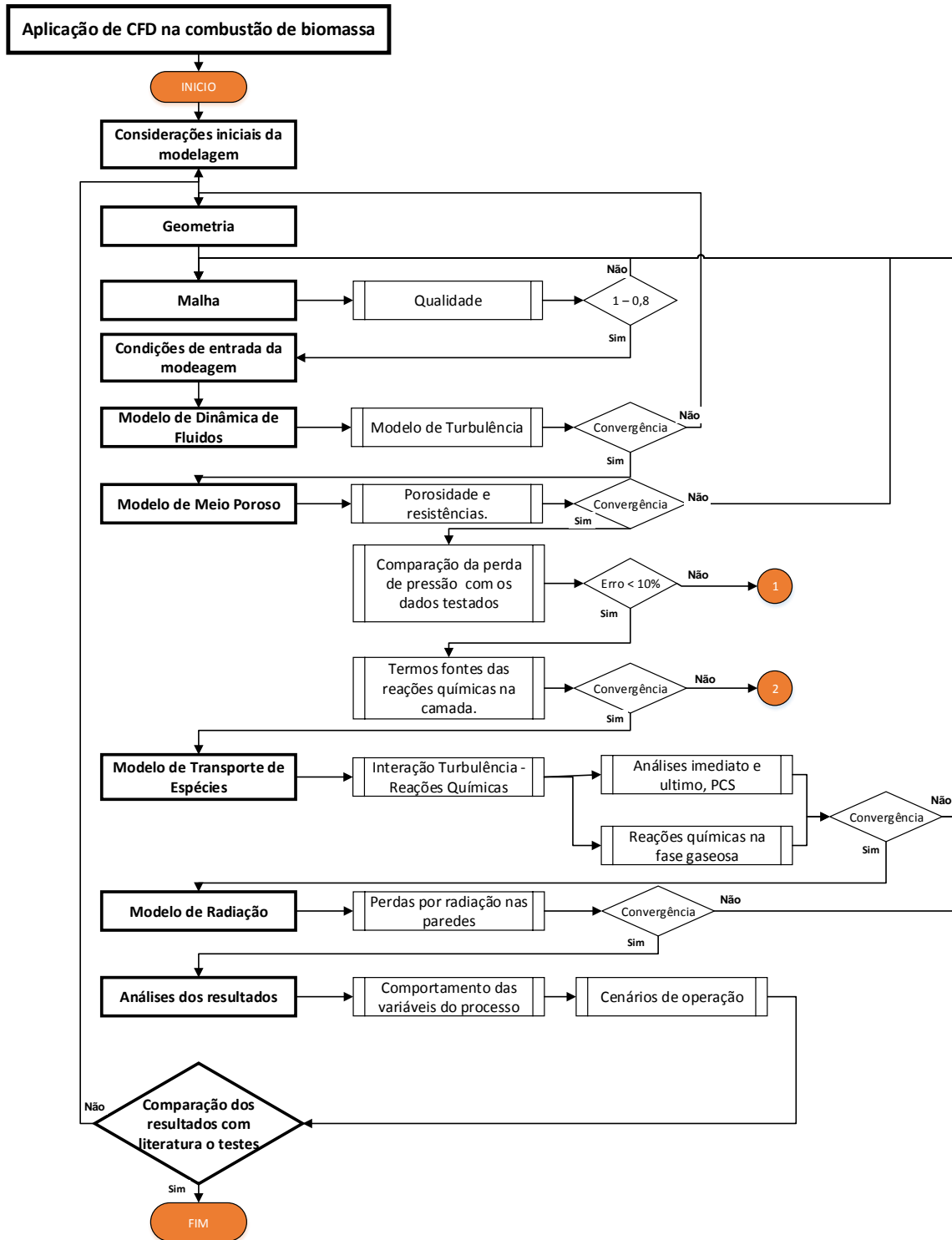


Figura 5.1 Fluxograma da modelagem da combustão de madeira em uma caldeira de grelha fixa usando CFD.

5.1 Considerações e Simplificações da Modelagem.

As considerações iniciais da modelagem variam dependendo do objetivo do estudo. Para este trabalho se considerou as seguintes condições iniciais com o propósito de modelar a combustão

da madeira em camada reduzindo o recurso computacional (Tabela 5.1). A modelagem foi usada para comparar vários cenários de operação e redesenhar a caldeira eficientemente.

Tabela 5.1 Condições Iniciais da Modelagem da Combustão de Biomassa em Camada.

Considerações Iniciais da Modelagem

- A combustão da madeira no leito foi modelada com distribuição uniforme, supondo que toda a biomassa foi queimada.
- A combustão foi modelada em estado estacionário, seguindo o modelo matemático Euleriano na fase gasosa.
- A fornalha tem perdas por radiação e por condução nas paredes da fornalha.
- A vazão de ar secundário foi medida em um teste e se considerou como zero.
- Foram analisados dois cenários: **Cenário 1**: Condições atuais da caldeira, a vazão de ar foi medida nos testes. **Cenário 2**: Vazão de ar secundário igual a 60% do ar total, o cenário foi proposto para aumentar a eficiência da combustão.
- Não foi considerada a mudança da porosidade na camada, que é produzida pela perda de massa na combustão da biomassa.
- Foi considerada a queda de pressão através da camada de combustível para o cálculo da porosidade.

Foi modelada a combustão de biomassa em leito em dois cenários com diferente distribuição do ar: Cenário 1, o ar primário é o 100 % do ar total, este cenário representa as condições atuais da caldeira de estudo. Cenário 2, o ar secundário é 60 % e o ar primário é 40 % do ar total. Adicionalmente foi modelada uma alternativa com 40% ar secundário e 60 % ar primário, porém os resultados mostraram maior eficiência no cenário 2. Os resultados que se mostram nos capítulos seguintes são dos Cenários 1 e 2.

5.2 Geometria da Modelagem

A geometria da modelagem foi gerada no software comercial Inventor Autodesk® (Figura 5.2). Para este tipo de análise a geometria representa o volume interior da fornalha ou o volume ocupado pelos gases de combustão dentro da fornalha, além do volume do ar de entrada e saída dos gases e o volume da camada de combustível. Neste volume total vão-se desenvolver as equações seguindo as leis da termodinâmica.

O duto de saída tem um comprimento 5 vezes maior que o comprimento característico da fornalha. Esta suposição se realiza com o objetivo de que os resultados não sejam restringidos pela geometria (aerodinâmica dos escoamentos) na saída dos gases, nem pelas condições de contorno na saída [29]. A geometria está formada por vários domínios, onde foram especificadas as condições de entrada.

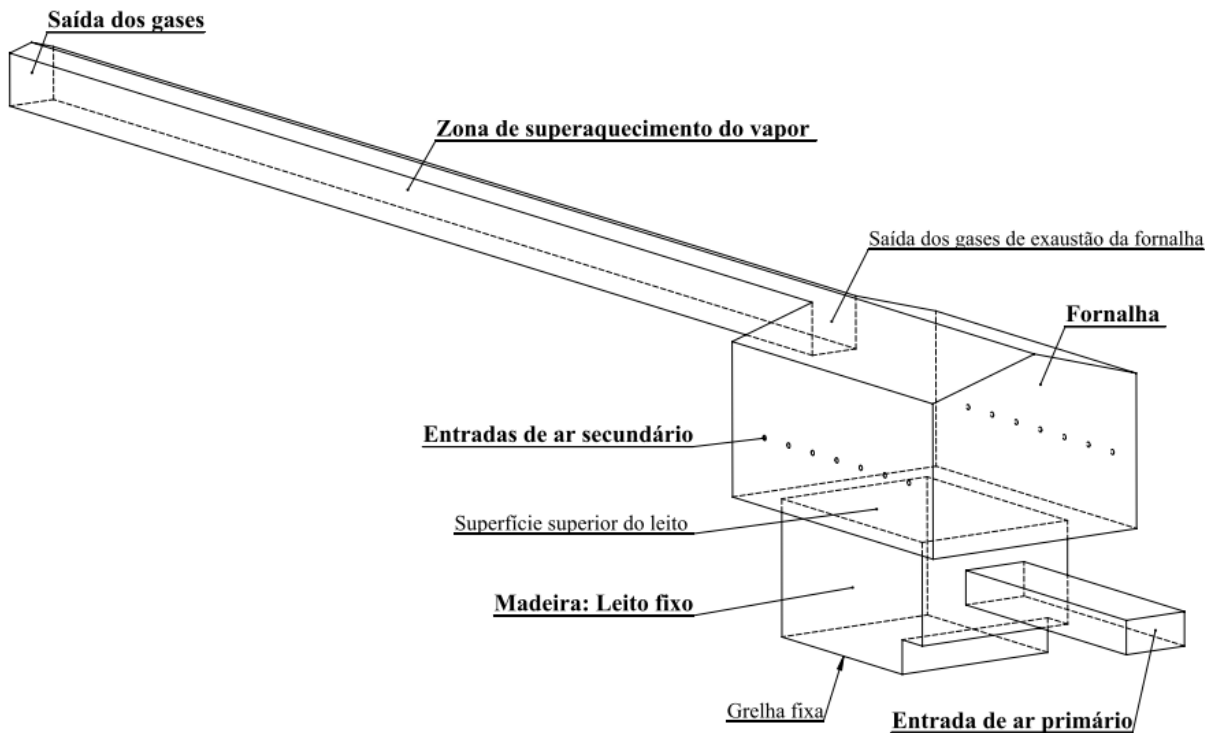


Figura 5.2. Estrutura da geometria da caldeira.

A fornalha de estudo, tem um sistema de alimentação de ar conformado por um ventilador que gera um fluxo no duto de entrada, no qual se distribui o ar pelo duto de ar primário localizado na parede lateral da fornalha e os dutos de ar secundários localizados na parte superior da fornalha, o ar secundário será usado na modelagem do Cenário 2 no Capítulo 5.7 deste trabalho.

5.3 Desenho da Malha

O desenho da malha é um processo muito importante para qualquer tipo da modelagem, neste estudo foi desenhada a malha a través da partição do volume de estudo em pequenos volumes, deste modo explica-se o método de volumes finitos, e a discretização das equações de conservação e da quantidade de movimento. Deste modo, uma malha com maior número de

células refinadas em algumas zonas da geometria do estudo, representa resultados mais detalhados, embora aumente o recurso computacional.

A variável adimensional y^+ da dinâmica de fluidos é usada como uma condição para o desenho da malha, a lei da parede mostra a relação através y^+ com a dinâmica de fluidos e se encontra no capítulo 3.3 deste trabalho. No presente estudo foi considerado valores de y^+ menores do que 100, deste modo são incluídos os efeitos provocados pela viscosidade no contato entre os gases e as paredes da fornalha. Quando o y^+ de referência é igual a 100, e calculando o número de Reynolds dentro da fornalha, pode-se calcular o comprimento do volume (y_p), a relação destas variáveis é mostrada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Relação entre Reynolds e a dimensão do volume criado (y_p) para um $y^+ < 100$.

| Re | I | U (m/s) | Kp (m^2/s^2) | y^+ | y_p (cm) |
|---------|------|---------|------------------|-------|------------|
| 6102,12 | 0,84 | 1,5 | 4,16 | 100 | 7 |

Quando o y^+ é 100 com uma velocidade de 1,5 m/s dentro da fornalha o comprimento do volume será de 7 cm e criado neste processo, assim o desenho da malha vai ter volumes uniformes em toda a geometria e o comprimento de cada volume varia na geometria, porém o comprimento na fornalha e na camada de combustível é de 7 cm, nesta zona ocorre a combustão dos gases e encontra-se a camada do combustível. O desenho da malha foi desenvolvido com o software ICEM CFD®.

Na saída dos gases de exaustão e na entrada de ar, o desenho da malha incrementa o tamanho dos volumes progressivamente, deste modo diminuiu-se o recurso computacional sem afetar os resultados. A figura 5.3 se mostra o desenho da malha usado na geometria da fornalha de estudo.

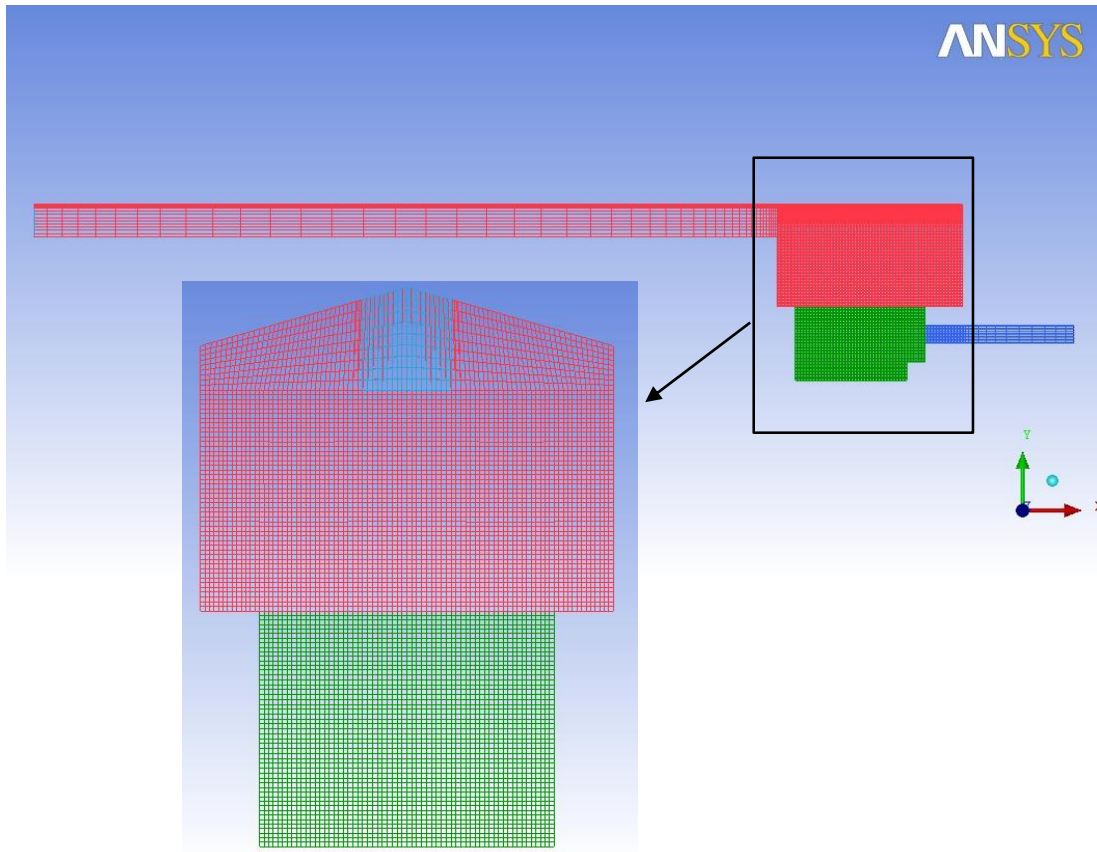


Figura 5.3 Desenho da malha para a geometria do estudo.

A primeira avaliação da malha foi feita no mesmo software, onde foi avaliado a qualidade dos elementos da malha de 0 até 1. O resultado da qualificação para a malha deste trabalho é mostrado na figura 5.4.

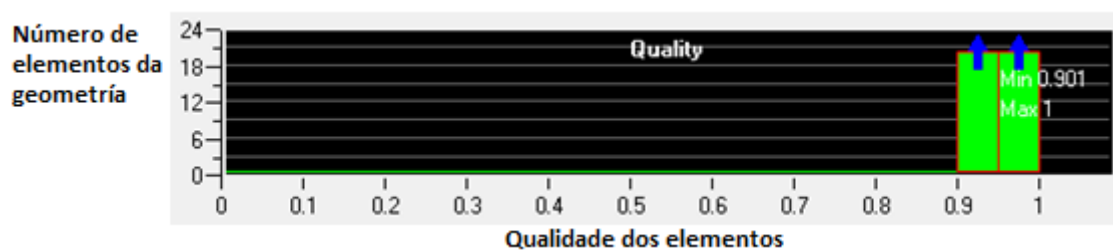


Figura 5.4 Avaliação da malha: Qualidade dos elementos da malha.

A figura 5.4, mostra que a qualidade dos elementos da malha desenhada foi entre 0,9 e 1, sendo 1 a maior qualificação, deste modo os erros produzidos na modelagem de estudo não serão ocasionados pela malha.

Nos resultados deste trabalho foi calculado o y^+ para a malha desenhada, comparando os resultados de y^+ da modelagem com os resultados da Tabela 5.2.

5.3.1 Cálculo de y^+

Para avaliar o desenho da malha foi calculado na modelagem o contorno de y^+ nas paredes da fornalha, o que é mostrado na Figura 5.5. Na região próxima as paredes da fornalha y^+ varia entre 0 até 80, porém valores maiores de 80 foram calculados nas paredes dos dutos na entrada do ar e na saída dos gases de exaustão. Entretanto, estas zonas encontram-se longe da zona de estudo na fornalha, deste modo os resultados calculados com malhas mais refinadas não apresentaram variações significativas aos deste estudo.

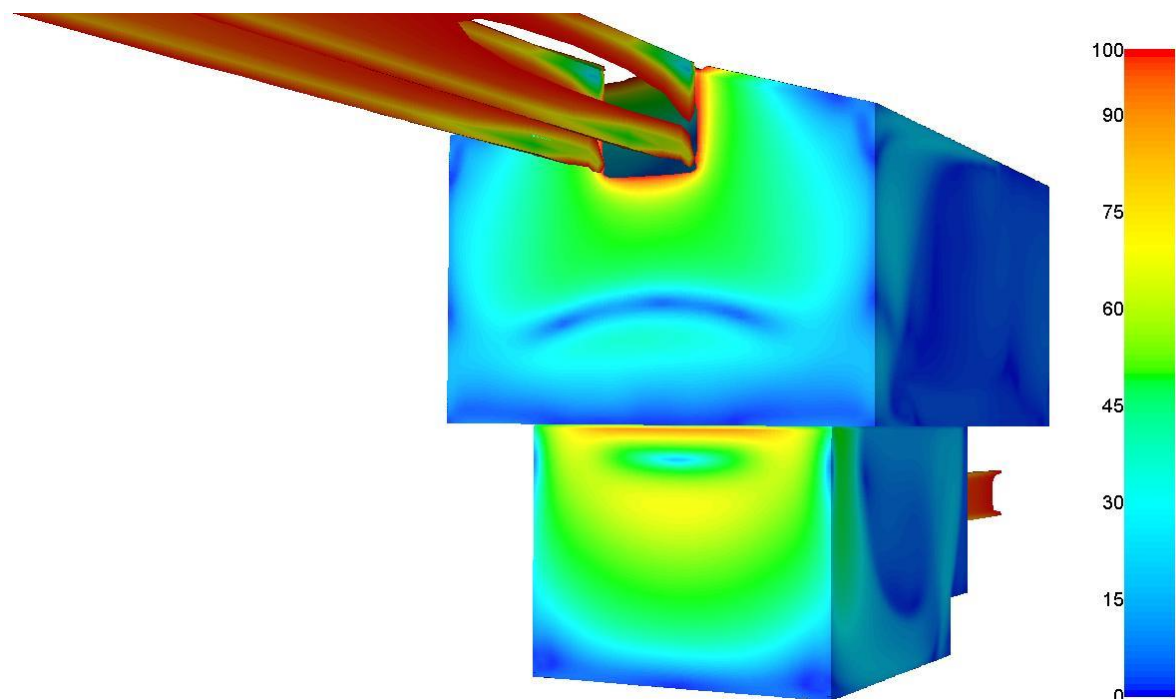


Figura 5.5 Contorno do Y^+ nas paredes da fornalha.

O contorno de y^+ permitiu saber que o cálculo do comprimento da célula concorda com o estimado no desenho da malha para um $y^+ = 100$ (Tabela 5.2). O contorno de y^+ é o mesmo para os dois cenários de estudo.

5.4 Condições Iniciais da Modelagem da Combustão

As considerações iniciais foram divididas em três tipos de variáveis de entrada: Caracterização da madeira, caracterização do leito de madeira, os termos fontes das espécies e da energia da combustão.

5.4.1 Caracterização da Madeira.

Os valores obtidos da análise de laboratório na caracterização da madeira são considerados como condições iniciais da modelagem. A caracterização da madeira deste estudo se mostra na tabela 5.3. As análises foram feitas no laboratório do grupo de pesquisa NEST na Universidade Federal de Itajubá.

Tabela 5.3 Valores meios de análise elementar, análise imediata e Poder Calorífico da madeira picada.

| Análise imediata (%) | | | | Análise elementar (%) | | | | | PCI* t | PCS(**) |
|----------------------|------|-----|------|-----------------------|------|-------|-------|-------|---------|---------|
| CF | MV | A | W | C | H | O | N | S | (MJ/kg) | |
| 11,1 | 73,0 | 0,7 | 15,2 | 45,78 | 5,92 | 42,83 | 0,392 | 0,093 | 18.433 | 19.951 |

(*) Adaptado de [54].

(**) O PCS foi calculado com os valores da análise elementar.

Os resultados da análise de laboratório da madeira mostram que a maior parcela são os voláteis, mas apresenta um conteúdo alto na umidade. O poder calorífico foi calculado para uma umidade de 15,2%. Estes valores foram comparados com composições de madeira encontradas na literatura.

5.4.2 Caracterização do Leito de Madeira como Meio Poroso.

As variáveis do leito de madeira mostradas na Tabela 5.4 foram calculadas usando as equações do Capítulo 3.4 deste trabalho: Modelo de Meio Poroso. As equações do meio poroso dependem da queda de pressão e a distância através do leito entre outras variáveis. Foram testadas a pressão a diferentes distâncias no leito de madeira na caldeira de estudo com o objetivo de resolver as equações do modelo de meio poroso.

Tabela 5.4 Caracterização do leito de madeira como meio poroso.

| Variáveis do Meio Poroso no leito de madeira. | |
|---|---------|
| Porosidade | 0,50 |
| Coefficiente de perdas pela permeabilidade α (1/m ²) | 7,75E-5 |
| Coefficiente de perdas inerciais (1/m) | 33,12 |
| Diâmetro característico (cm) | 2 |
| Velocidade no leito (m/s) | 2,5 |

As variáveis mostradas na Tabela 5.4 para a caracterização do leito de madeira como meio

poroso permite modelar os componentes convectivos dos fluidos através da camada de madeira.

5.4.3 Termos Fontes das Espécies da Combustão

Os termos fontes das espécies e da energia foram calculados com as equações 4.1 e 4.2 deste trabalho. Os cálculos dos termos fontes são o objetivo de estudo para a maioria das pesquisas sobre combustão. Os termos fonte são adicionados nas equações de conservação e movimento. Foram calculados os termos fonte da espécie que participam de cada subprocesso da combustão, assim como da secagem o termo fonte é de vapor de água; da desvolatilização de voláteis e da queima do char e do carbono residual, do mesmo modo foi calculado um termo fonte de energia para cada subprocesso. Os resultados dos termos fontes para cada subprocesso da combustão são mostrados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 Termos fontes de espécies e de energia para cada subprocesso da combustão da madeira.

| Processo da combustão | Espécie | Termos fontes R (kg/m ³ s) | Energia liberada ou consumida E (W/m ³) |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|---|
| Secagem | VaporH ₂ O | 0,0117 | -2.6536,54 |
| Desvolatilização | Voláteis | 0,0766 | 3.1492,29 |
| Queima do char | O ₂ | -0,0425 | 14.6728,52 |
| | CO ₂ | 0,0584 | |
| TOTAL | | | 15.1684,27 |

Os subprocessos da combustão para este estudo são explicados no Capítulo 4.4.3. O termo fonte de voláteis apresenta a maior quantidade devido á composição da madeira, e a maior energia liberada no processo foi determinada na queima do carbono residual. O sinal menos do termo fonte de oxigênio representa que ele está sendo consumido no processo.

Os valores mostrados foram ingressados na modelagem da combustão de leito de madeira, foi usado o programa Fluent ANSYS ® V.14 para resolver as equações de conservação e quantidade de movimento aplicando o CFD. Os resultados são mostrados a seguir.

5.5 Planos de Análise dos Resultados

Para analisar os resultados dos cálculos das variáveis da combustão (perfil de temperaturas e velocidades, fração mássica das espécies e pressão, entre outras) na fornalha (geometria), foram criados planos de análise dentro da fornalha com o objetivo de comparar os comportamentos das variáveis nos dois cenários de análise, com os resultados foi possível identificar na fornalha

e quantificar a eficiência dos subprocessos da combustão. A Equação 5.1 foi usada para calcular a distância de separação entre cada plano ou linha onde foram analisados os resultados.

$$\text{Comprimento característico} = \frac{\varnothing_{\text{entrada de ar}}}{L_{\text{característica da fornalha}}} \quad (5.1)$$

Onde o $\varnothing_{\text{entrada de ar}}$, é o diâmetro característico do duto de entrada do ar = 20 cm,

e $L_{\text{característica da fornalha}}$, é o comprimento perpendicular da fornalha = 1 m.

Na Figura 5.6 são mostradas o $\varnothing_{\text{entrada de ar}}$ e a $L_{\text{característica da fornalha}}$.

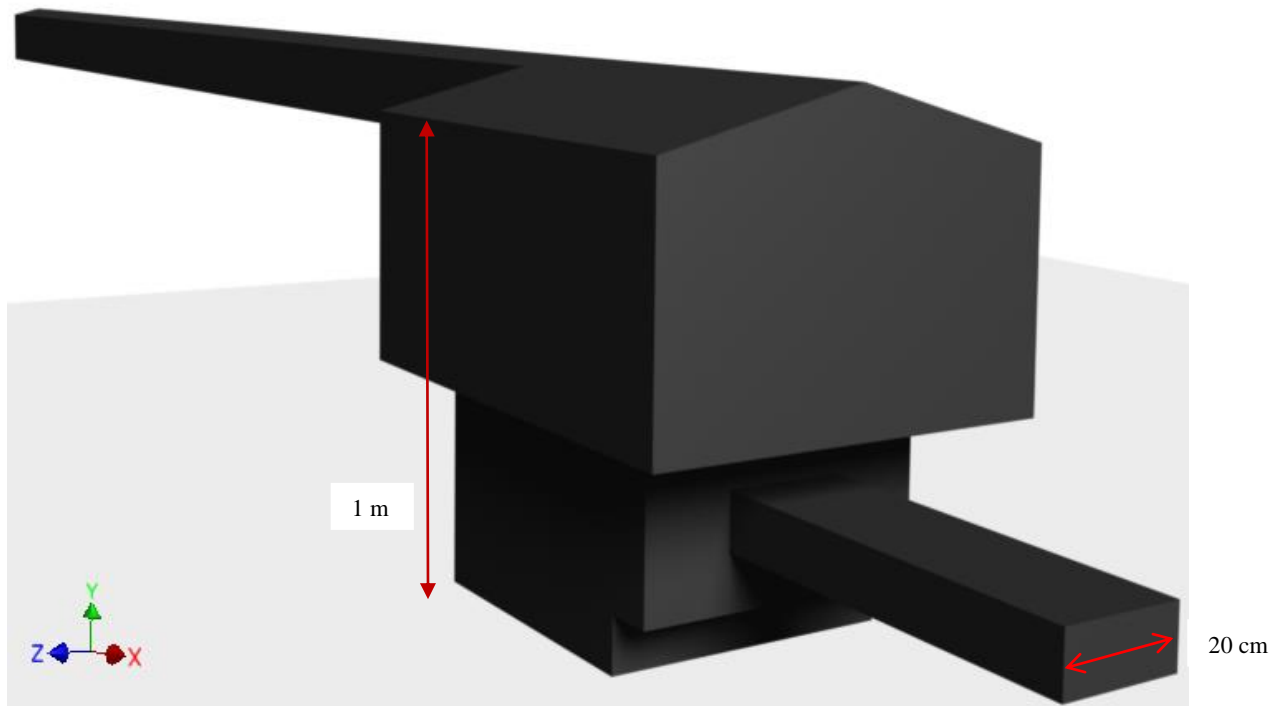


Figura 5.6 Comprimento característico da caldeira do estudo.

O comprimento característico neste estudo foi 20 cm, deste modo os resultados foram analisados em cada plano ou linha dentro da fornalha, os quais estão separados 20 cm do próximo ponto de análise. Na Figura 5.7 são mostrados os planos de análise das variáveis calculadas nos eixos XY, ZX e YZ (Figura 5.6). Foram usados os mesmos planos de análise no Cenário 2.

Os resultados obtidos da modelagem da combustão da madeira foram analisados nos planos da Figura 5.7, porém neste trabalho somente são mostrados os resultados das principais variáveis da combustão, nos planos que foram considerados de interesse para explicar o que aconteceu em cada subprocesso da combustão. A seguir são analisados os resultados da modelagem

segundo a variável de análise: perfil de temperatura e de velocidades, fração molar de voláteis, oxigênio, CO₂, CO e linhas de corrente nos planos mostrados.

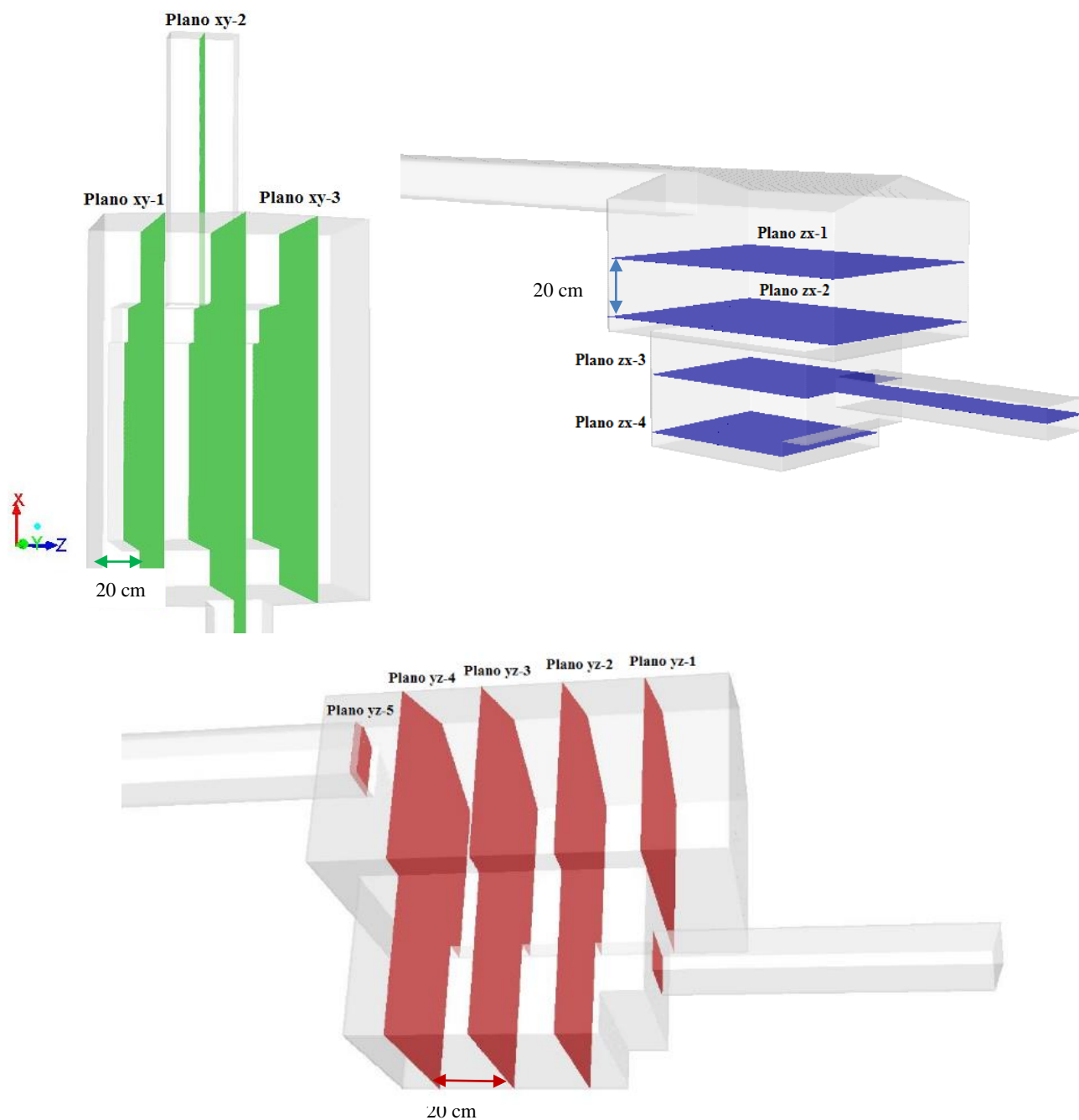


Figura 5.7. Planos de análise dentro da fornalha de estudo.

5.6 Cenário 1: Modelagem da Combustão de Madeira em Leito com 100 % de Ar Primário

As condições atuais da caldeira de estudo, foram medidas nos testes e mostraram que a vazão de ar secundário é praticamente 0 m³/s, deste modo, 100% do ar entra pelo duto de ar primário. Porém dentro da fornalha tem sido desenhado dutos de ar secundário na cima do leito de combustível, onde ele tem perdas na sua estrutura, de forma que o desenho atual da caldeira apresenta processos ineficientes. A modelagem deste cenário permitirá analisar o comportamento e a quantidade dos gases da combustão em toda a fornalha para depois propor um cenário com eficiência maior.

5.6.1 Variáveis de Entrada para o Cenário 1

As condições iniciais da modelagem são mostradas na tabela 5.6. Os modelos matemáticos foram testados nas simulações onde se selecionaram os que representaram maior facilidade no processamento, porém os modelos garantem resultados adequados segundo o mostrado na literatura.

Tabela 5.6 Condições de Entrada da Modelagem no Cenário 1: 100 % ar primário.

| Variável de Entrada | | Descrição |
|-------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| Vazão de ar primário | 480 (m ³ /h) | Medida no Teste |
| Vazão de ar secundário | 0 (m ³ /h) | Medida no Teste |
| Pressão na saída | Atmosférica | Suposição |
| Fluxo de biomassa | 39 (kg/h) | Medida no Teste |
| Material da biomassa | Madeira picada | Dado de desenho |
| Modelo de radiação | DO | Capítulo 3.6 |
| Modelo de turbulência | k-ε Realizável | Capítulo 3.3 |
| Modelo de Transporte de Espécies | Eddy-Dissipation | Capítulo 3.5 |
| Acoplamento da pressão - velocidade | Esquema Simples | Capítulo 3.1.1 |
| Discretização do termo convectivo | QUICK | Capítulo 3.1.2 |

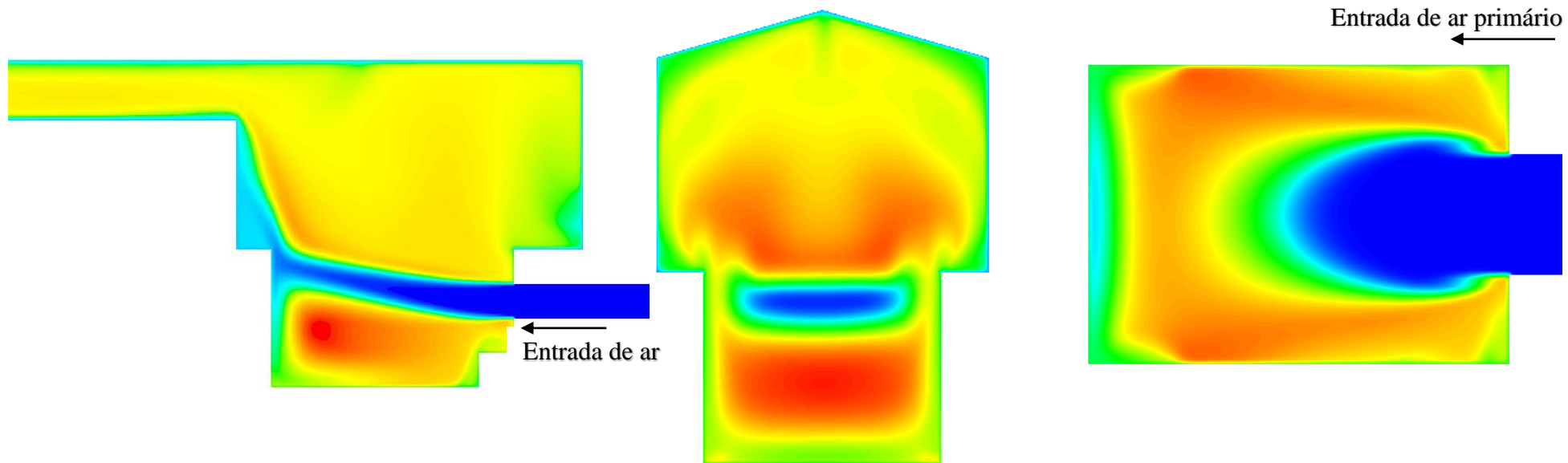
Além das condições iniciais da modelagem mostradas no Capítulo 5.4, as variáveis de entrada identificam cada modelagem, na descrição da Tabela 5.6 são mostrados a obtenção de cada variável.

5.6.2 Perfil de Temperaturas

Na Figura 5.8 se mostra o resultado do perfil de temperaturas em cada plano. a) Plano XY-2. b) Plano YZ-3. c) Plano ZX-3. Na Figura 5.8.a se observa que o fluxo de ar primário a 30°C entra na fornalha justamente no leito de madeira, a força do ar permite que o fluxo choque à parede da fornalha produzindo duas correntes com diferentes direções, uma no sentido da saída dos gases e outra em direção à zona inferior da camada de madeira, deste modo o fluxo de ar frio reduz a temperatura nas zonas por onde o fluxo passa no leito, ficando no centro da camada a maior temperatura com velocidades lentas do fluxo do ar. Na Figura 5.8.b se mostra que justo em cima do leito a temperatura apresenta um aumento causado pela reação dos voláteis com o oxigênio. Na Figura 5.8.c as zonas de maior temperatura são as laterais do leito de madeira produzido por um fluxo de calor que vai desde o centro da camada até a parte superior da fornalha subindo pelos laterais da fornalha.

A maior temperatura (1150 °C) está localizada no centro do leito de madeira, a 15 cm de altura com relação à grelha. Na fornalha, em cima do leito a temperatura é aproximadamente 900 °C. Deste modo a maior fonte de calor produzida pela combustão da madeira encontra-se no centro e em cima da camada e se difunde a cima da fornalha pelos laterais do leito.

No trabalho de Barros [53] estudou-se o sistema caldeira – motor Stirling usando a mesma caldeira deste estudo e foi alimentada com madeira picada. De [53] foi obtida a temperatura dos gases na saída da fornalha e comparada com o resultado na modelagem. Para a modelagem foi considerado o mesmo cenário no que foram feitos os testes e adicionalmente foi criado um plano de cálculo no mesmo lugar onde se realizou a medição da temperatura (Plano YZ-5 da Figura 5.7). O perfil de temperatura no plano criado pode se ver na Figura 5.9. A comparação da temperatura medida no teste com o valor calculado na modelagem é mostrada na Tabela 5.7.



a) Perfil de temperatura no plano XY-2

b) Perfil de temperatura no plano YZ-3

c) Perfil de temperatura no plano ZX-3



Figura 5.8. Perfil de Temperatura na Fornalha.

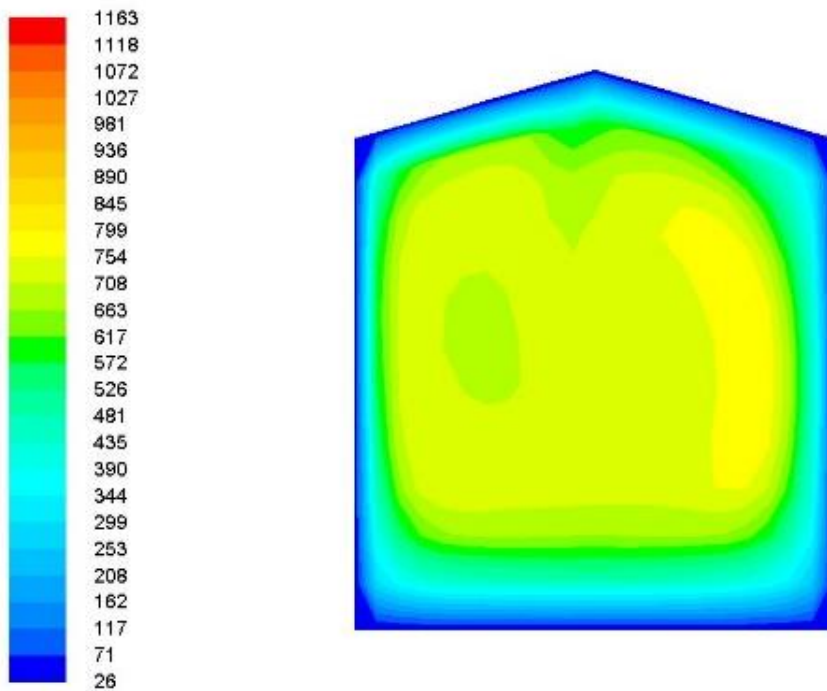


Figura 5.9 Perfil de temperaturas na saída dos gases da fornalha.

Tabela 5.7 Resultados da temperatura média calculada com a modelagem e obtida do trabalho de [53].

| Comparação da Temperaturas obtida na modelagem e no teste | |
|---|--------|
| Valor Calculado na Modelagem (°C) | 795,8 |
| Valor medido no Teste por [53] (°C) | 761,27 |
| Diferença entre os resultados (%) | 4,34 |

A temperatura calculada na modelagem é a temperatura média no plano de análise mostrado na Figura 5.9. A diferença de 4,3 % entre o resultado da temperatura obtida no teste e na modelagem é baixa, assegurando a confiabilidade nos resultados.

5.6.3 Perfil de Velocidades

O resultado do perfil de velocidades é mostrado na Figura 5.10 nos três planos de análise. Na Figura 5.10.a se descreve o câmbio na velocidade do fluxo de ar primário no plano XY-2, pode se notar que a velocidade do fluxo de ar diminui quando entra na fornalha e aumenta na entrada do duto de saída dos gases (33 m/s), devido à mudança na área transversal dos dutos. Na Figura 5.10.b se observa que as zonas com velocidades entre 6 até 10 m/s se encontram na parte inferior

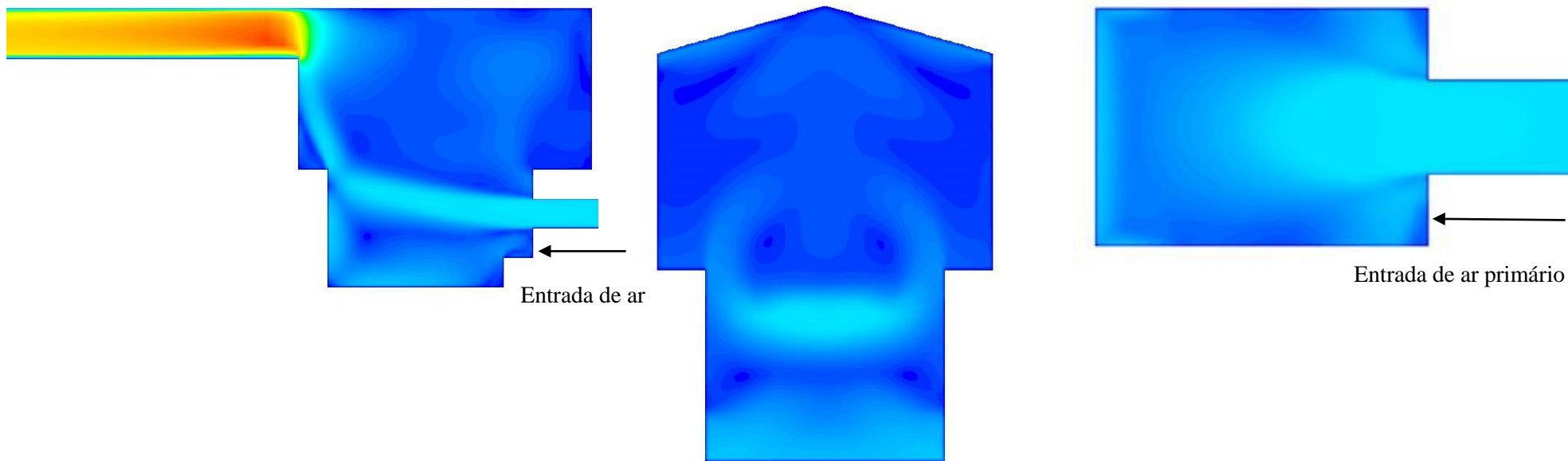
e no centro do leito de madeira causada pela forte corrente de ar primário, porém na parte superior do leito se apresentam fortes mudanças na velocidade (1 – 13 m/s). Na Figura 5.10.c se mostra a redução da velocidade do fluxo de ar desde o duto de entrada 15 m/s até a fornalha.

Depois de observar o resultado do perfil de velocidades e de temperatura pode-se perceber que nos lugares onde a velocidade decresce a temperatura também diminui, mas não é possível estabelecer uma relação direta entre elas somente porque em outras zonas onde a temperatura cresceu a velocidade também aumentou, deste modo foi possível definir que as reações simuladas dependem fortemente da velocidade do fluxo dos gases e do ar, mas também depende da mistura produzida entre as espécies na fornalha, por exemplo O_2 + voláteis. A seguir serão analisados os resultados das linhas de corrente em relação à velocidade, observando o comportamento dos fluidos dentro da fornalha.

5.6.4 Linhas de Corrente

As linhas de corrente servem neste caso para visualizar a trajetória do ar através do leito de madeira e dos gases na fornalha. Na figura 5.11 pode se ver as linhas de corrente com relação à velocidade dentro da fornalha. Na Figura 5.11.a observa-se que a corrente de ar primário entra no leito a uma velocidade elevada (13m/s) e apresenta um comportamento laminar, mas depois de chocar com a parede posterior da fornalha, a corrente é dividida em dois fluxos: um fluxo forma um vórtice no inferior da camada, no centro do vórtice a velocidade decresce, o outro fluxo se dirige a duto de saída dos gases na parte superior do leito, em forma desorganizada e turbulenta. Na figura 5.11.b mostra linhas de corrente com maior velocidade nas paredes laterais da fornalha difundindo o calor e as espécies liberadas no leito de madeira à fase continua acima do leito. Na Figura 5.11.c pode se ver o comportamento turbulento que se produz na fornalha e no leito de madeira provocados pelos efeitos convectivos dos fluidos.

Os vórtices produzidos pelo fluxo de ar dentro da fornalha ocasionam a mistura do O_2 com as espécies liberadas nos subprocessos da combustão que ocorrem no leito de madeira: a secagem, a desvolatilização e a queima do char, assim nos vórtices reagem os voláteis com o O_2 aumentando a temperatura.



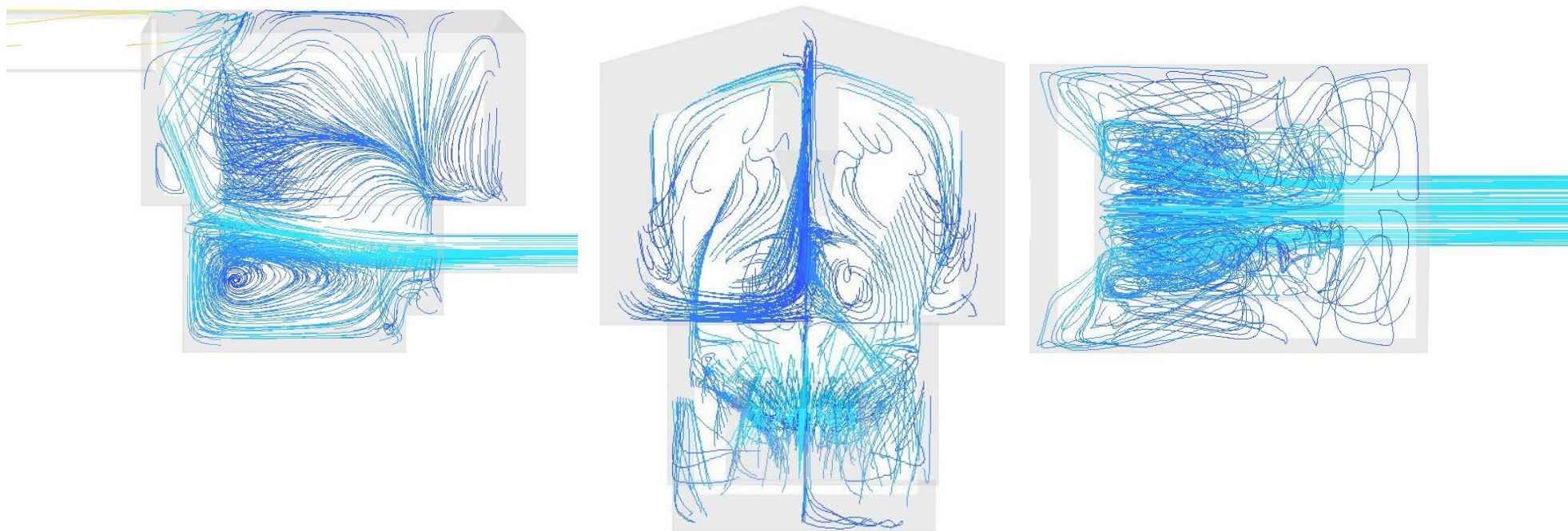
a) Perfil de velocidades no plano XY-2

b) Perfil de velocidades no plano YZ-3

c) Perfil de velocidades no plano ZX-3



Figura 5.10. Perfil de velocidades na fornalha.



a) Linhas de corrente no plano XY-2

b) Linhas de corrente no plano YZ-3

c) Linhas de corrente no plano ZX-3



Figura 5.11. Linhas de corrente com relação à velocidade dos gases dentro da fornalha.

5.6.5 Fração Molar de Voláteis

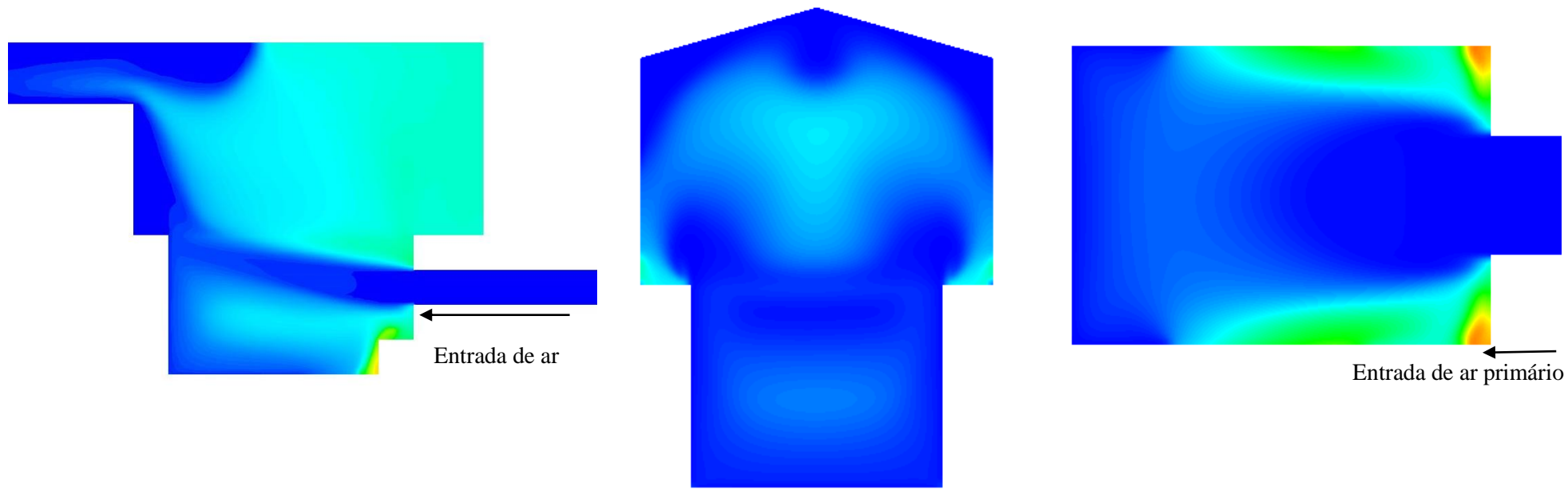
A figura 5.12 mostra o cálculo da fração molar dos voláteis para cada plano de análise na fornalha. a) Plano XY-2. b) Plano YZ-3. c) Plano ZX-3. Na Figura 5.12.a se apresenta a maior quantidade dos voláteis e estão localizados na parte inferior da fornalha sobre a grelha, a Figura 5.12.b mostra outra zona de alta quantidade de voláteis na parte superior do leito e a Figura 5.12.c expõe que os voláteis foram deslocados pela corrente do ar e muitos dos voláteis podem não reagir com o O_2 , inclusive alguns dos voláteis saem da fornalha pelo duto de saída dos gases sem reagir prejudicando a eficiência da combustão.

Os voláteis são liberados pelo leito provocado pela desvolatilização da madeira. A fração molar dos voláteis tem relação com a corrente do ar, onde a corrente de ar primário passa através do leito a quantidade dos voláteis diminui, dessa forma a maior quantidade de voláteis se encontra nas zonas onde se reduz o fluxo do ar, porém em cima da camada foi calculada uma quantidade significativa de voláteis provocada pela desvolatilização da madeira

5.6.6 Fração Molar de Oxigênio

A Figura 5.13 mostra o resultado da fração molar de oxigênio nos planos XY-2, YZ-3 e ZX-3 na fornalha de estudo. Na Figura 5.13.a se observa que a maior quantidade de O_2 se encontra na entrada de ar e vai se reduzindo à medida que atravessa o leito de madeira e o comportamento do O_2 é similar a mostrado no perfil de velocidades Figura 5.10.a. Na Figura 5.13.b pode se ver que o O_2 atravessa pelo centro do leito e pelo choque do fluxo do ar conta a parede da fornalha são formadas várias correntes de ar na parte inferior da fornalha. A Figura 5.13.c mostra a redução na quantidade de O_2 através do leito.

O comportamento do perfil de O_2 é da forma contrária ao resultado dos voláteis, assim onde a quantidade de O_2 é alta os voláteis são quase 0 e vice-versa, por conseguinte os resultados demonstram que encima do leito os voláteis não regiram na totalidade pela falta de O_2 nesta zona, porém uma grande quantidade de O_2 sai da fornalha sem reagir ocasionado pelo forte fluxo de ar primário reduzindo a eficiência global da caldeira.



a) Fração molar de voláteis no plano XY-2

b) Fração molar de voláteis YZ-3

c) Fração molar de voláteis ZX-3

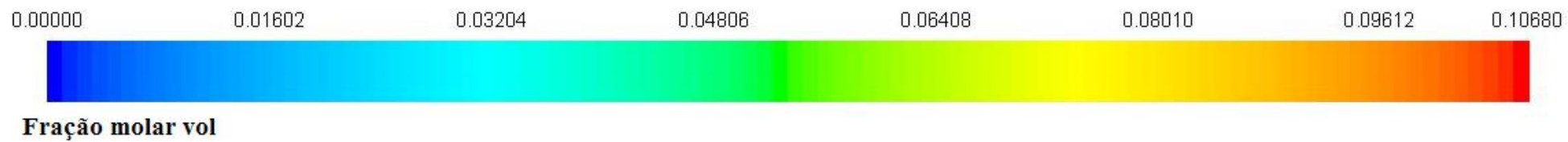
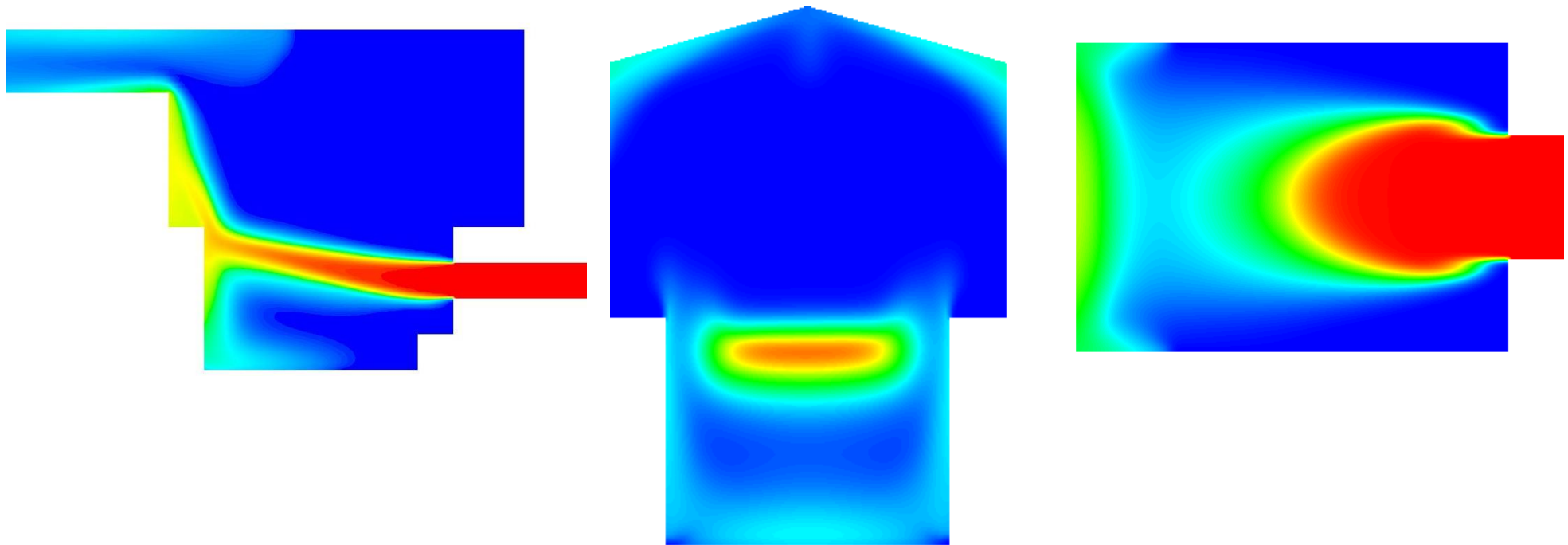


Figura 5.12. Fração molar de voláteis na fornalha.



a) Fração molar de O₂, plano XY-2

b) Fração molar de O₂ plano YZ-3

c) Fração molar de O₂ plano ZX-3

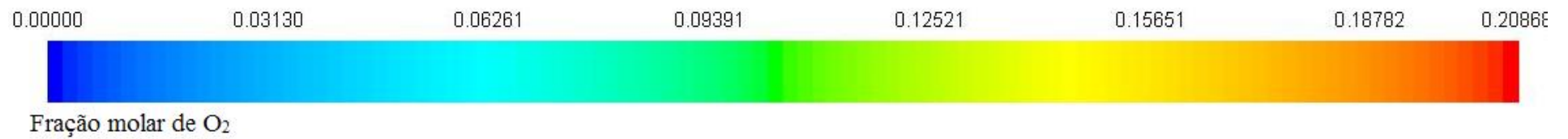


Figura 5.13. Fração molar de oxigênio na fornalha.

5.6.7 Fração molar de CO

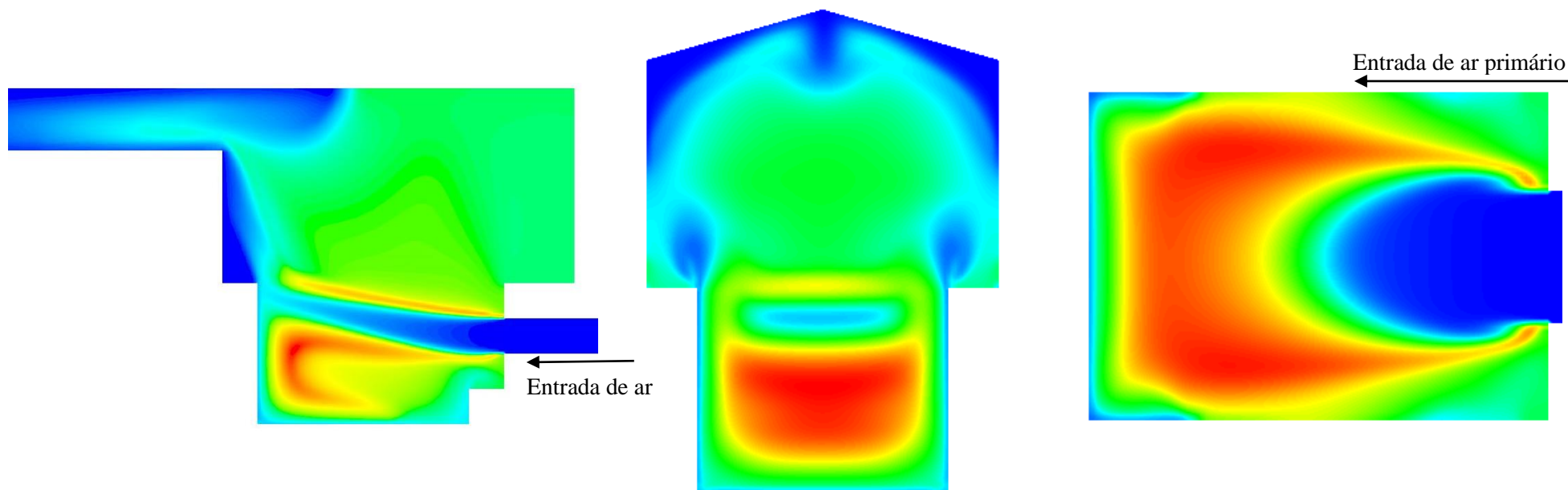
Na Figura 5.14 se mostra o resultado do perfil da fração molar de CO nos planos XY-2, YZ-3 e ZX-3 na fornalha de estudo. O CO é um dos produtos da reação dos voláteis com o O₂ na fase continua, logo o CO é um indicador do lugar onde se produz esta reação. A Figura 5.14.a mostra que há concentrações de CO na parte superior da camada, onde o O₂ é consumido em sua totalidade (Figura 5.13), mas ainda se tem concentrações de voláteis (Figura 5.12). Na Figura 5.14.b pode se observar que o comportamento é parecido ao mostrado no perfil de temperaturas na Figura 5.8, onde as maiores concentrações de CO se encontram no centro e em cima do leito de madeira, ao igual que as maiores temperaturas em razão de que nestes lugares ocorreu a reação entre os voláteis e o O₂ produzindo fonte de calor e CO. Na Figura 5.14.c se observa que as maiores concentrações de CO estão localizadas na camada onde a velocidade diminui e há concentrações de voláteis e o O₂.

O comportamento do CO é similar ao perfil de voláteis, deste modo as maiores concentrações de CO se calcularam onde as concentrações de O₂ se reduzem. Também se observa uma relação com o perfil de temperaturas, a maior temperatura maior concentração de CO, porém nestes lugares a velocidade também é reduzida.

5.6.8 Fração molar de CO₂

Na Figura 5.15 se mostra o perfil de CO₂ na fornalha. O CO₂ se produz quando o carbono conteúdo na madeira reage com O₂. O comportamento de CO é similar ao perfil de voláteis, assim as maiores concentrações estão localizadas em zonas de baixa velocidade devido a que a corrente de ar empurra a concentração de CO que foi liberada na camada de madeira, no subprocesso da queima do char. As maiores concentrações podem se observar nas Figuras 5.15.b e 5.15.c em cima do leito de madeira e nas paredes da fornalha.

Outros resultados e análise obtidos desta modelagem são mostrados no ANEXO 5.



a) Fração molar de CO, plano XY-2

b) Fração molar de CO, plano YZ-3

c) Fração molar de CO, plano ZX-3

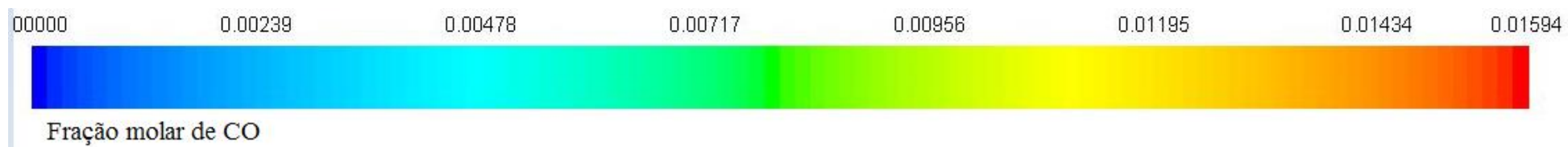
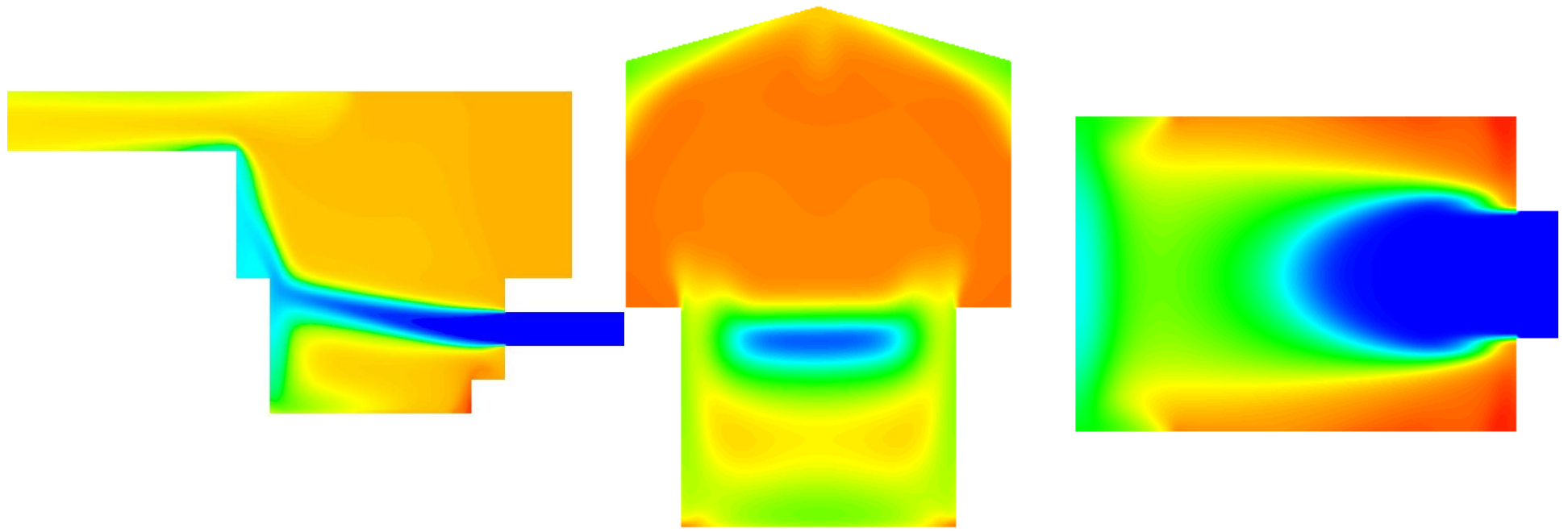


Figura 5.14. Fração molar de CO na fornalha.



a) Fração molar de CO₂, plano XY-2

b) Fração molar de CO₂, plano YZ-3

c) Fração molar de CO₂, plano ZX-3

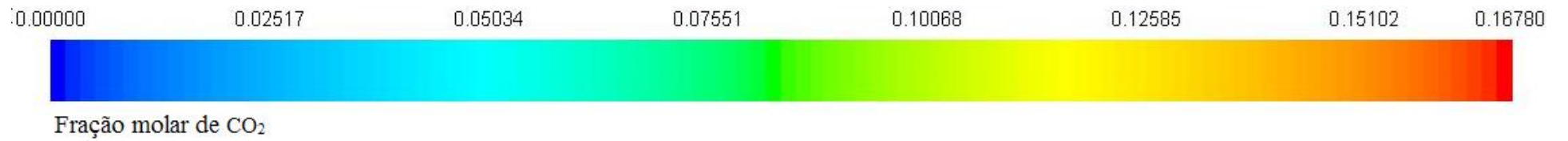


Figura 5.15. Fração molar de CO₂ na fornalha.

5.7 Cenário 2: Modelagem da Combustão de Madeira em Camada, com Ar primário (40%) e Ar secundário (60%).

Depois de analisar vários cenários com diferentes distribuições de ar primário e secundário, foi selecionado um segundo cenário de estudo onde se determinou maior eficiência no processo da combustão do que o sistema atual descrito no Cenário 1 no Capítulo 5.6. O Cenário 2 tem uma distribuição de vazão de ar assim: o 40 % do ar total entra pelos dutos de ar primário e o 60 % pelos dutos do ar secundário localizados na parte superior da fornalha. Os resultados da modelagem do Cenário 1 evidenciaram a necessidade de usar o ar secundário na caldeira de estudo para aumentar a eficiência da combustão, mostrado pela alta quantidade de voláteis que calculada na fornalha. Além disso, na caldeira deste estudo tem desenhado os dutos de ar secundário, desta forma é fácil implementar o Cenário 2 no atual sistema.

A geometria deste cenário é igual à do Cenário 1, mas no Cenário 2 foi usado a entrada de ar secundário mostrada no Capítulo 5.2 deste trabalho, da mesma forma foi usada o mesmo desenho de malha e as condições iniciais do que o Cenário 1.

5.7.1 Variáveis de Entrada para o Cenário 2

As variáveis de entrada para o Cenário 2 são mostradas na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 Condições de Entrada da Modelagem no Cenário 2: 40 % ar primário e 60% ar secundário.

| Variável de Entrada | | Descrição |
|-------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| Vazão de ar primário | 192 (m ³ /h) | Calculada |
| Vazão de ar secundário | 288 (m ³ /h) | Calculada |
| Pressão na saída | Atmosférica | Suposição |
| Fluxo de biomassa | 39 (kg/h) | Medida no Teste |
| Material da biomassa | Madeira picada | Dado de desenho |
| Modelo de radiação | DO | Capítulo 3.6 |
| Modelo de turbulência | k-ε Realizável | Capítulo 3.3 |
| Modelo de Transporte de Espécies | Eddy-Dissipation | Capítulo 3.5 |
| Acoplamento da pressão - velocidade | Esquema Simples | Capítulo 3.1.1 |
| Discretização do termo convectivo | QUICK | Capítulo 3.1.2 |

5.7.2 Perfil de Temperaturas

Na Figura 5.16 se mostra o resultado do perfil de temperaturas em cada plano. a) Plano XY-2. b) Plano YZ-3. c) Plano ZX-3. Na Figura 5.16.a se observa que a maior temperatura é de 960 °C e foi calculada na parte superior do leito de madeira, onde os voláteis liberados da camada de madeira reagem com o O₂ do ar. Na Figura 5.16.b se mostra a entrada de ar secundário à temperatura ambiente na fornalha, o que reduz a temperatura nesta zona. A Figura 5.16.c evidencia a mudança da temperatura desde a entrada de ar primário até a fornalha demonstrando o enfreamento ocasionado pela corrente de ar que entra a temperatura ambiente.

A diferença dos resultados do Cenário 1 mostrados na Figura 5.8, pode se notar que maior uniformidade no perfil de temperaturas na fornalha, neste cenário a corrente de ar não choca contra a parede posterior da fornalha, mas também se divide em duas correntes, uma em direção inferior do leito sobre a grelha e outra no sentido superior do leito de madeira. A temperatura calculada no Cenário 2 no leito de madeira se reduz em comparação no Cenário 1, causado por que no cenário 2 o ar primário esfria o leito e o ar secundário reagi com os voláteis liberados no leito.

5.7.3 Perfil de Velocidades

O resultado do perfil de velocidades calculado na modelagem para o cenário 2 é mostrado na Figura 5.17 para os três planos de análise. Na figura 5.17.a pode se ver que a corrente de ar primário é dividida em duas correntes de baixa velocidade (2-5 m/s), uma se dirige na parte da camada de madeira e a outra na zona superior do leito. Na Figura 5.17.b se mostra que a maior velocidade está na entrada de ar secundário em cima do leito 20 m/s, porém a velocidade vai decrescendo à medida que entra na fornalha. A figura 5.17.c mostra a redução da velocidade do fluxo de ar primário na entrada da fornalha.

Com o resultado do perfil de temperatura Figura 5.16 é possível identificar uma relação entre a velocidade e a temperatura deste modo as temperaturas altas a velocidade diminui comparada com os resultados obtido no Cenário 1 Capítulo 5.6.3 deste trabalho. Com a vazão de ar secundário no Cenário 2 há uma maior distribuição da velocidade e de temperatura na fornalha, deste modo a corrente forte de ar no Cenário 1 é reduzida no leito.

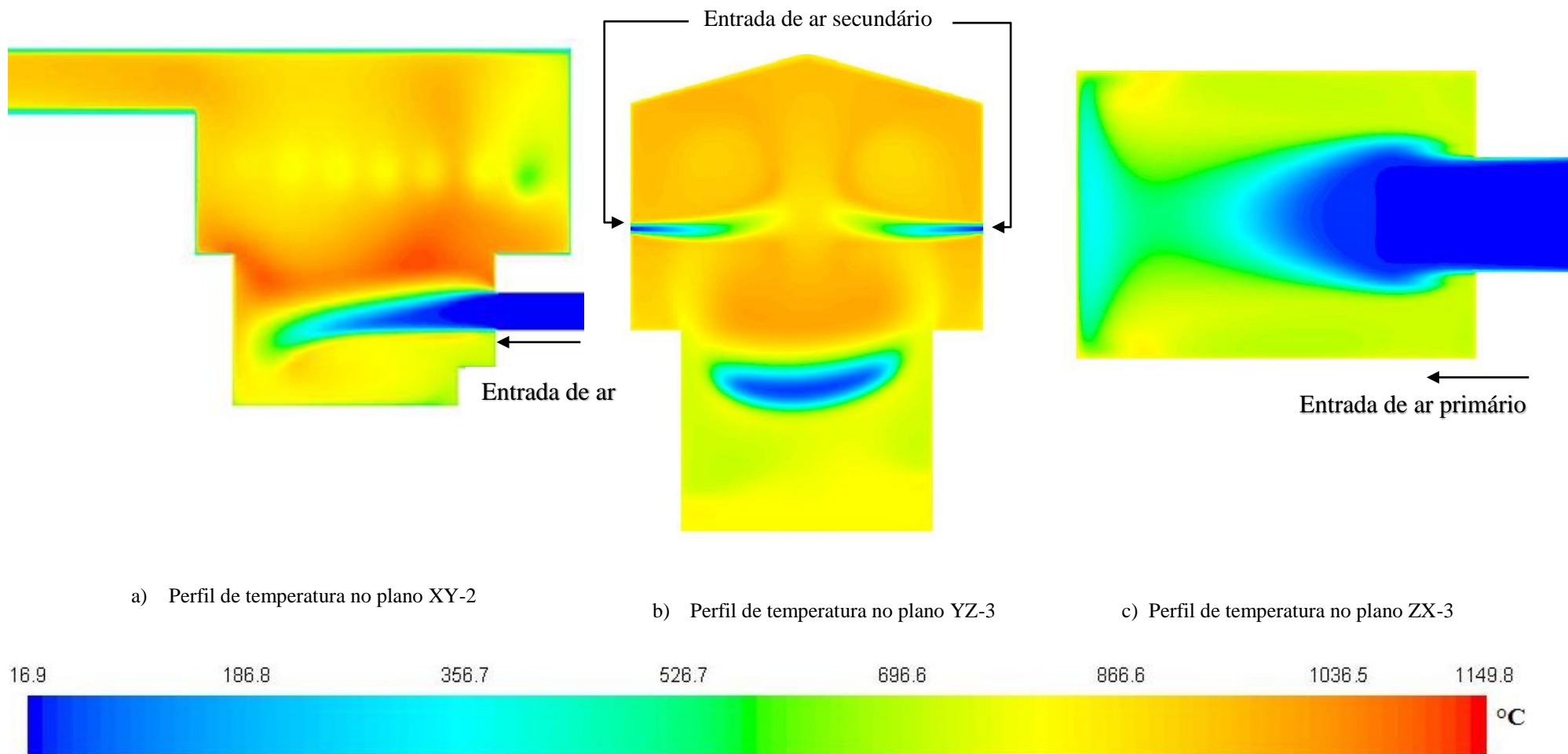


Figura 5.16. Perfil de temperatura, modelagem no Cenário 2: 40% ar primário e 60% ar secundário.

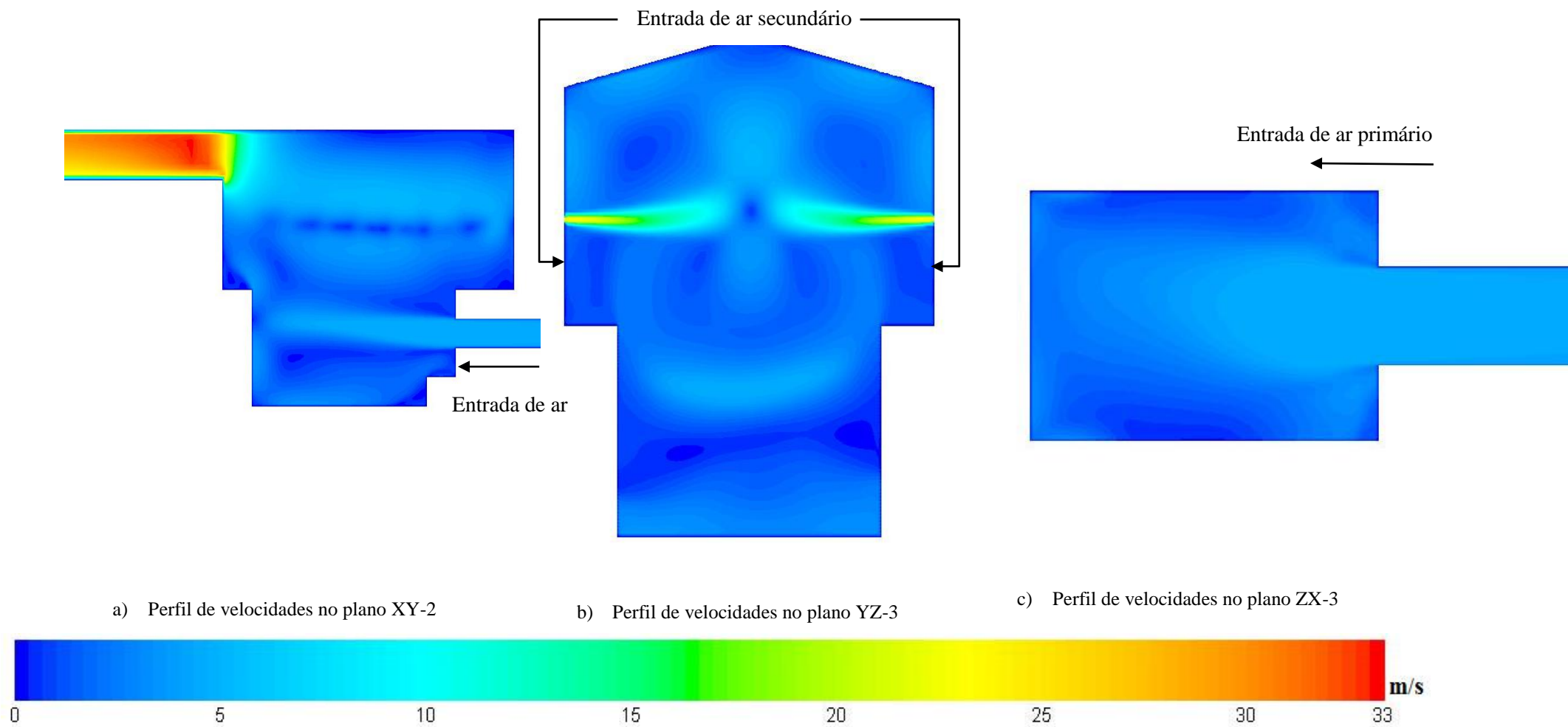


Figura 5.17. Perfil de velocidades, no cenário 2.

5.7.4 Linhas de Corrente

As linhas de corrente indicam o comportamento dos fluxos dentro da fornalha, na Figura 5.18 se encontram os resultados da modelagem das linhas de corrente com relação com a velocidade nos três planos de análise. Na Figura 5.18.a se observa que há duas zonas de formação de vórtices, a primeira zona é na parte inferior do leito sobre a grelha fixa na qual a velocidade se encontra entre 1 e 4 m/s e a segunda é sobre o leito, onde as correntes de ar secundário e a corrente do ar primário causam a formação de vórtices mais notáveis que no inferior do leito. Na Figura 5.18.b se observa detalhadamente que o fluxo de ar sobe através das laterais do leito até o superior da fornalha onde são originados fortes vórtices que misturam os voláteis com o O₂. A Figura 5.18.c mostra a corrente de ar primário através do leito de madeira e as altas velocidades produzidas pela entrada de ar secundário.

Com os resultados obtidos e as linhas de corrente, pode se notar que em cima do leito onde são formados os maiores vórtices e a velocidade se encontra entre 25 e 1 m/s, a temperatura tem melhor distribuição em toda a fornalha em relação ao Cenário 2, deste modo a eficiência da combustão aumenta na fornalha no Cenário 2.

5.7.5 Fração Molar das Espécies: Voláteis, O₂, CO e CO₂

Na figura 5.19 se mostram os resultados do perfil da fração molar para os voláteis, o O₂, CO e CO₂ no plano XY-2. Na Figura 5.19.a se mostra o resultado da fração molar dos voláteis e se observa que a maior quantidade de voláteis se encontram na parte inferior do leito sobre a grelha, por causa da difusão pela corrente do ar primário. Da mesma maneira que no Cenário 1, os voláteis são movimentados pela corrente de ar assim a maior quantidade de voláteis foi localizado nas zonas de menor quantidade de O₂, porém no Cenário 2 há uma redução de voláteis em cima do leito indicado maior queima dos voláteis nesta zona. A Figura 5.19.b apresenta a fração molar de O₂, as maiores quantidades foram calculadas nas zonas de influência do ar, mas se observa maior distribuição de O₂ que no Cenário 1, em cima do leito de madeira onde se produz a queima dos voláteis no processo da combustão. Na Figura 5.19.c se mostra o resultado da fração molar de CO, a maior quantidade do CO se encontra no leito no qual são liberados os voláteis da madeira, também se observa que o CO é movimentado pela corrente de ar secundário até esta zona. A Figura 5.19.c mostra o resultado da fração molar de CO₂, cuja distribuição do CO₂ na fornalha é maior no Cenário 2 que no Cenário1 influenciado pela recirculação dos fluxos.

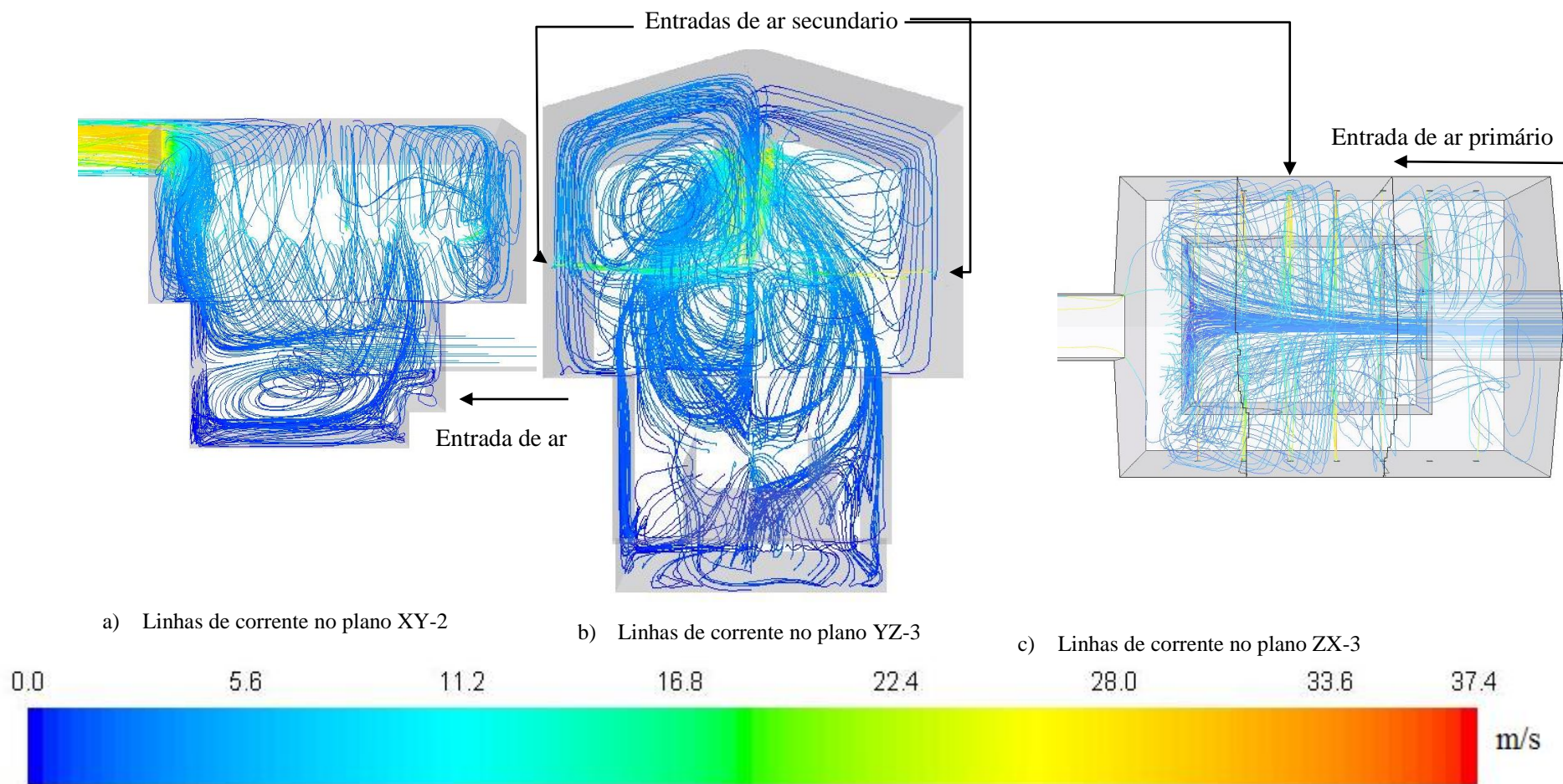


Figura 5.18. Linhas de corrente no cenário 2.

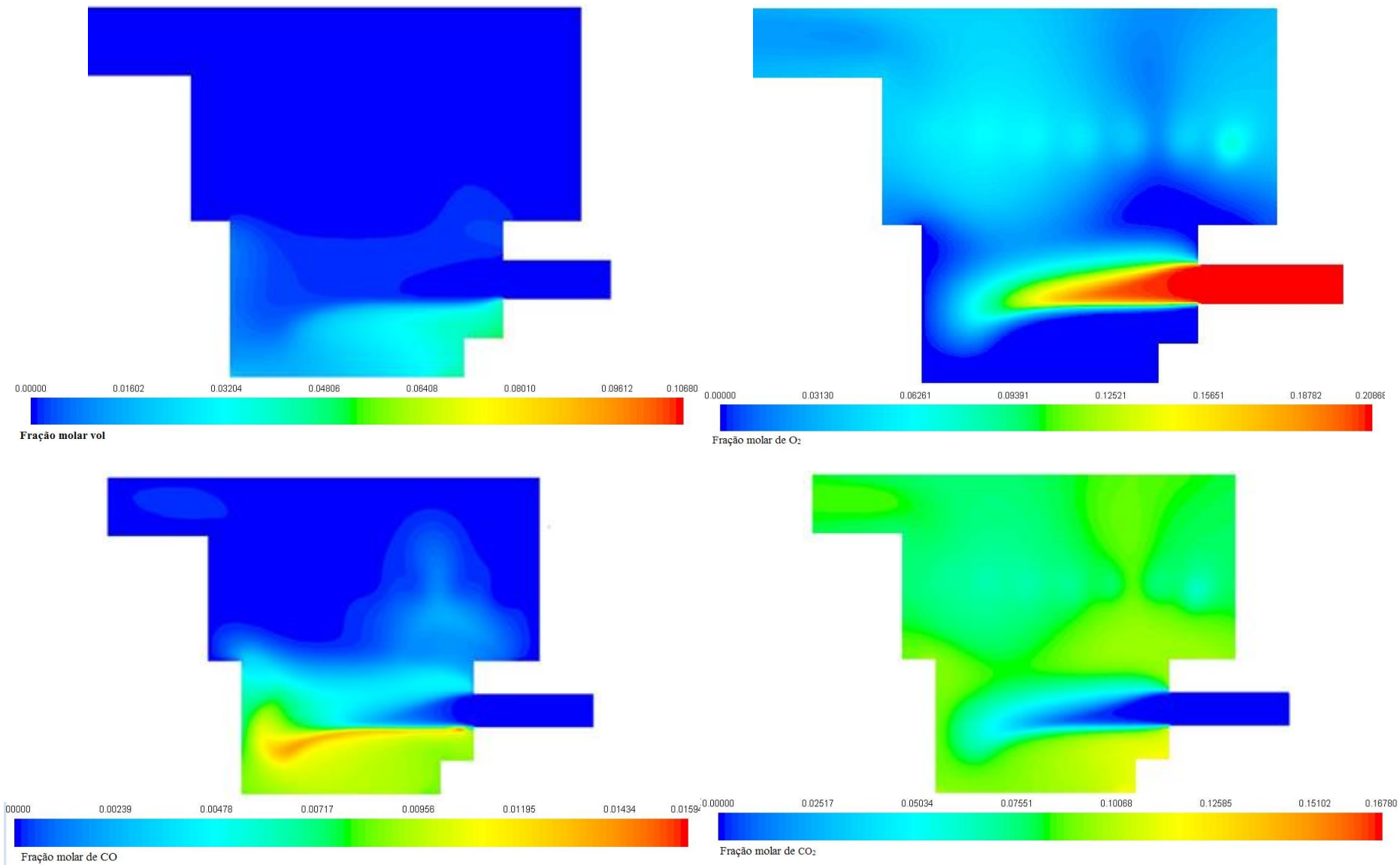


Figura 5.19. Fração molar das espécies: voláteis, O₂, CO e CO₂ no Cenário 2.

5.7.6 Comportamento das Principais Variáveis da Combustão Através da Camada de Madeira

Adicionalmente neste cenário foi calculado o comportamento de cada variável na linha de análise 3-Y mostrada na Figura 5.20.

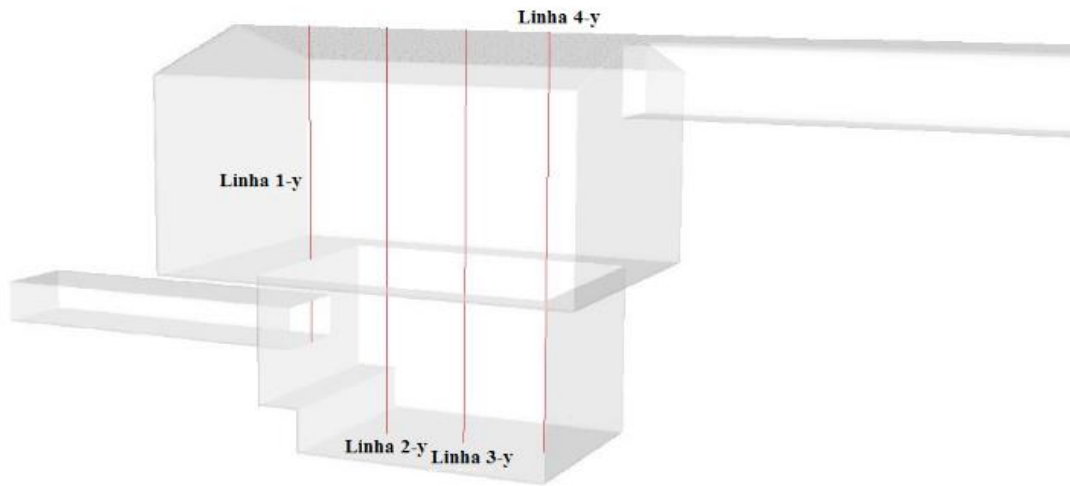


Figura 5.20. Linhas de análise dos resultados.

A linha 3-Y inicia na grelha, na parte inferior do leito de madeira, e atravessa o leito até chegar em cima da fornalha. Os resultados das principais variáveis da combustão nesta linha são mostrados na Figura 5.21.

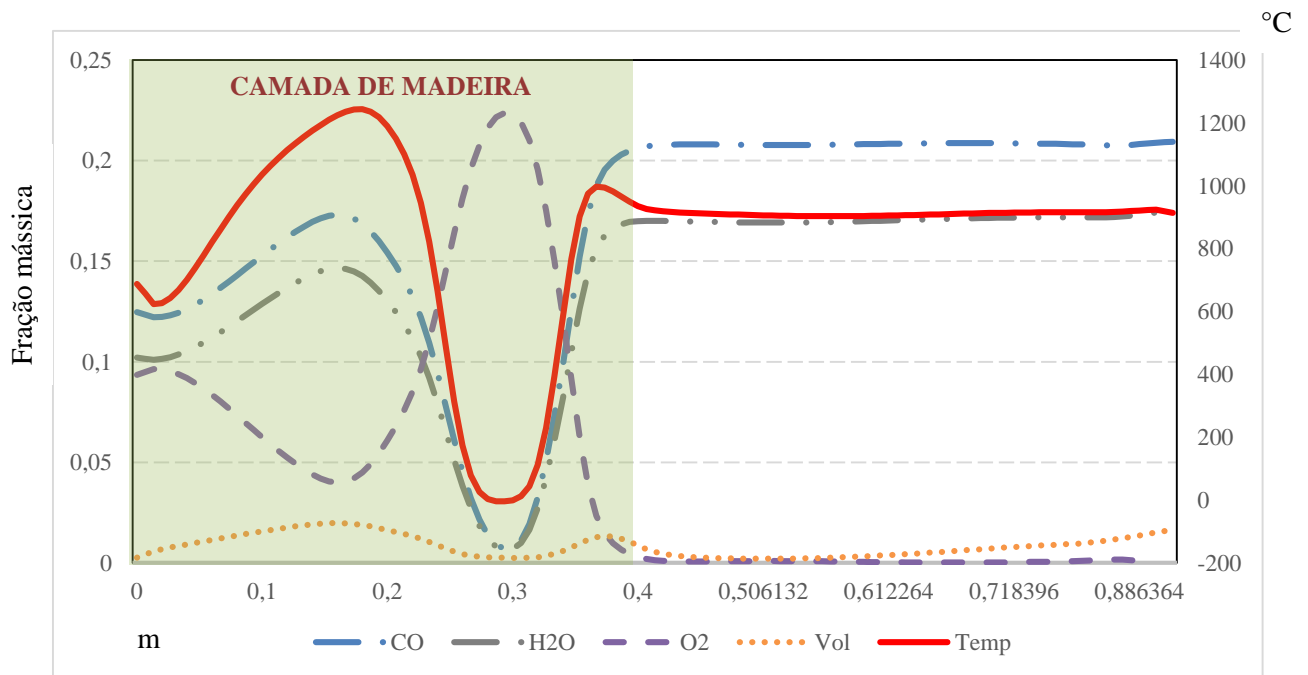


Figura 5.21. Resultados das variáveis da combustão na Linha 3-Y no Cenário 2.

Na Figura 5.21 se mostra o comportamento de cada variável de análise da combustão desde a grelha até a cima da fornalha no eixo Y. Na camada de madeira as variáveis apresentam oscilações produzidas pelas recirculações do fluxo de ar primário, porém em cima do leito o comportamento é mais estável.

Em resumo obtidos os resultados da modelagem com o Cenário 2 em relação ao Cenário 1 os fatores que favorecem o processo da combustão são:

- A formação de recirculações nas zonas de maior concentração de voláteis e O_2 principalmente.
- A diminuição da vazão de ar primário evitando o deslocamento das espécies liberadas no leito de madeira à parte superior da saída dos gases.
- A entrada de ar secundário na parte superior do leito permite reagir os voláteis liberados na camada de madeira provocando aumento na temperatura favorecendo o superaquecimento da água nesta zona da caldeira.

5.8 Comparativa dos Cenários 1 e 2

5.8.1 Eficiência da Fornalha

Para comparar os Cenários 1 e 2 foi criado um plano de análise com se observa na Figura 5.22 neste plano foram calculadas todas as variáveis das espécies da combustão com o fim de calcular a eficiência da fornalha.

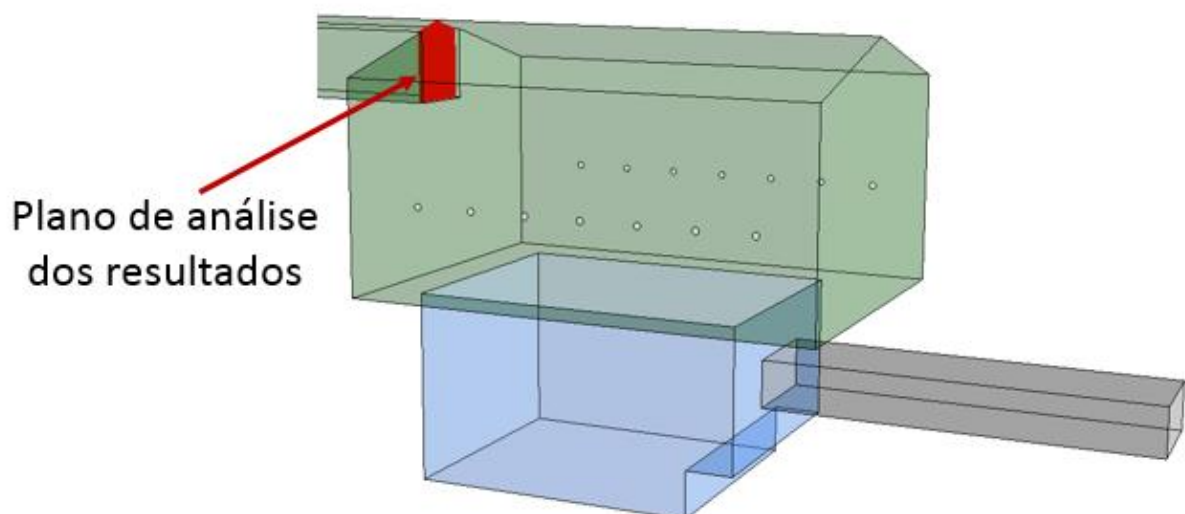


Figura 5.22. Plano de análise dos resultados obtidos com a modelagem nos cenários 1 e 2.

Os resultados das variáveis da combustão no plano de análise são mostrados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9. Resultados da modelagem para o cenário 1 e 2.

| Tabela comparativa | | |
|---|------------------------------------|---|
| Variável | Cenário 1: 100% ar primário | Cenário 2: 40% ar primário e 60% ar secundário |
| Temperatura (°C) | 795 | 853 |
| Voláteis (Fração mássica) | 0,0044 | 0,0016 |
| Oxigênio (Fração mássica) | 0,0514 | 0,0436 |
| CO (Fração mássica) | 0,0027 | 0,0011 |
| CO₂ (Fração mássica) | 0,1639 | 0,1844 |
| Tempo de residência % | 70 | 100 |
| Velocidade (m/s) | 29,28 | 27,78 |
| Eficiência na fornalha método indireto (%) | 73 | 78 |

O cálculo da eficiência dos cenários 1 e 2 foi feito pelo método indireto mostrado no Capítulo 2.3.2 deste trabalho, neste cálculo foram usadas algumas suposições na quantidade de matéria no queimado e de cinzas, porém a eficiência do cenário 2 foi maior devido à temperatura e CO₂ na saída da fornalha em relação ao cenário 1.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a modelagem da combustão de biomassa em leito utilizando o CFD, calculando o comportamento das variáveis de cada subprocessos da combustão, o que permitiu modificar a distribuição de ar primário e secundário, diminuindo a combustão incompleta.

Foi proposta e desenvolvida uma metodologia para a modelagem da combustão de biomassa em leito usando CFD no qual foram selecionados os modelos matemáticos adequados, a metodologia pode ser utilizada para projetar caldeiras, definir cenários eficientes e para identificar problemas de operação.

Foi proposta um segundo cenário com uma distribuição de ar primário de 40% e 60% de ar secundário, onde se evidenciou os fatores que favorecem o aumento da eficiência de 73 a 78% na fornalha do estudo.

Para a modelagem foi selecionado O modelo *Eddy-Dissipation*, que acopla a turbulência com as reações químicas, o qual simula adequadamente a combustão gerando resultados que concordam com a literatura na produção de espécies e de energia.

O modelo selecionado para simular a radiação foi o DO, já que das alternativas mostradas na literatura (modelos DO e P1) o modelo P1 apresentou problemas quando existem temperaturas concentradas, porém o modelo DO apresentou maior tempo para atingir a estabilidade da convergência.

A comparação das variáveis calculadas na modelagem com alguns dados teóricos e experimentais permitem inferir que os resultados obtidos são coerentes, por exemplo: a temperatura medida experimentalmente comparada com a calculada na modelagem apresentou um erro de 4,34 %, segundo a literatura é um erro razoável.

A modelagem feita neste trabalho servira como base para trabalhos posteriores no grupo de pesquisa do NEST da Universidade Federal de Itajubá.

6.1 Recomendações para trabalhos futuros

- O sistema de conversão estudado neste trabalho ainda não conta com os instrumentos de medição que permitam realizar testes e avaliar diferentes cenários de operação não foi possível validar experimentalmente a modelagem recomenda validar o modelo.
- O presente trabalho foi feito com recursos computacionais mínimos, assim algumas vezes a modelagem foi limitada por esta consideração, recomenda-se melhorar a modelagem em regime transitório incluindo a taxa cinética de liberação para cada espécie que faz parte da combustão, em um computador adequado para esta modelagem.
- Incluir na modelagem aspectos ambientais tais como a formação de NO_x . Recomenda-se estudar os modelos já incluídos no software Fluent ANSYS® e implementá-los na modelagem.
- Recomenda-se realizar a análise térmica em TGA para a madeira em estudo e incluir os valores cinéticos determinados experimentalmente no modelo.

REFERÊNCIAS

- [1] IEA International Energy Agency, *World Energy Outlook 2012: Executive Summary*. 2013. De: <www.iea.org>.
- [2] GEA Global Energy Assessment, *Toward a Sustainable Future Key Findings Summary for Policy makers Technical Summary*. Summary Rio + 20. Estados Unidos: New York, 2014.
- [3] IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, *Sinopse do censo Demográfico 2010*. Brasil, 2012. Disponível em:
<<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=11&uf=00>>.
- [4] IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, *Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura, Brasil, 2004*. Disponível em: 2010
<<http://saladeimprensa.ibge.gov.br/noticias?view=noticia&id=1&busca=1&idnoticia=497>>
- [5] J. L. Azevedo, *Mecânica dos fluidos computacional*. São José dos Campos: Embraer, 2000.
- [6] REN 21 Renewables Energy Policy Network for the 21st Century. *Renewables 2014: Global Status Report*. Alemanha: Bonn, p.21, Junho, 2014.
- [7] MME Ministério de Minas e Energias e EPE Empresa de Pesquisa Energética, *Balço Energético Nacional BEN 2014*, p.14-27. 2014.
- [8] ANNEL Agencia Nacional de Energia Elétrica, *Atlas de Energia Elétrica do Brasil: Terceira edição*. Brasília, DF, p. 63-73. 2012.
- [9] Martini, P. R, “Conversão Pirolítica de Bagaço Residual da Indústria de Suco de Laranja e Caracterização Química dos Produtos”. 2009. Dissertação (mestrado em química) PPGQ, UFSM, Santa Maria: 2009.
- [10] J. Farrell, “Report on DOE’s Energy Efficiency and Renewable Energy Biomass Program, U.S”. Department of Energy: Biological and Environmental Research Advisory Committee. Outubro 4, 2010.
- [11] A. Faaij, “Bio-energy in Europe: changing technology choices”. *Energy Policy*, cap 34, p.322–342, 2006.
- [12] L. Reis, “Geração de energia elétrica: tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade”. Editora Manole. 3ª Ed. 2003.
- [13] W. Green, R. Perry. *Perry’s Chemical Engineers Handbook*. Estados Unidos. The McGraw-Hill, Inc. p.21-13, 1984.
- [14] L. A. Nogueira, E. E. Silva, M. A. Trossero. *Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações*. Brasília: ANEEL, p.50-54, 2000.

- [15] M. F. Nogueira, G. Rendeiro, “Caracterização Energética da Biomassa Vegetal. Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia”. Brasília: Ministério de Minas e Energia, p. 52-63. 2008.
- [16] S. McAllister, J. Y. Chen, A. C. Fernandez. *Fundamental of Combustion Process*. New York: Springer, 2011.
- [17] M. E. Rodrigues, “Influência das características do combustível no desempenho energético e ambiental de caldeiras domésticas”. Instituto de Superior Técnico. Universidad Técnica de Lisboa. Faculdade de Engenharia Mecânica. 2010.
- [18] A. T. Matos, “Tratamento de resíduos agroindustriais”. Curso sobre tratamento de resíduos Agroindustriais, Fundação Estadual do Meio Ambiente. Viçosa, 2005.
- [19] J. C. F Macedo, “Análise Térmica e Ambiental da Queima do Lodo Primário da Fabricação de Papel e Celulose em Caldeira de Biomassa à Grelha”. Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2006.
- [20] CENICAÑA Centro de Investigación de la Caña de Azucar. *Informe anual*. Colombia, Cali: San Antonio de los Caballeros, Junio, 2012.
- [21] E. Bazzo, Geração de Vapor. Universidade Federal de Santa Catarina. 2. Ed. Florianópolis. 1995.
- [22] A. D. Salum, “Eficiência Energética Em Sistemas De Combustão De Caldeiras”. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial. Universidade Federal de Bahia. 2011.
- [23] A. Demirbas, “An overview on biomass pyrolysis”, *Energy Sources*, Vol. 24, pp 471-482, 2002.
- [24] J. Dias, “Utilização da biomassa: avaliação dos resíduos e utilização de pellets em caldeiras domésticas”. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2002.
- [25] E. L. Silva, P. S. Beaton, G. Lazo, “Determinación de los coeficientes característicos del bagazo para el cálculo térmico de calderas”. *Ingeniería Energética*. Vol. 13, No. 3, p. 39-45. 1992.
- [26] S. Van Loo, J. Koppejan, *The handbook of biomass and co-firing*. Earthscan ISBN: 978-1-84407-249-1. 2008.
- [27] N. P. Jiménez, “Simulação da Combustão de Coque em Regeneradores FCC Usando Fluidodinâmica Computacional”, Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. Campinas, 2011.
- [28] J. S. Vásques, “Simulación numérica directa em paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes em flujos com capa limite desprendida. Aplicada em instalaciones deportivas com gradas cubiertas”, Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Cap. 3. 2004.

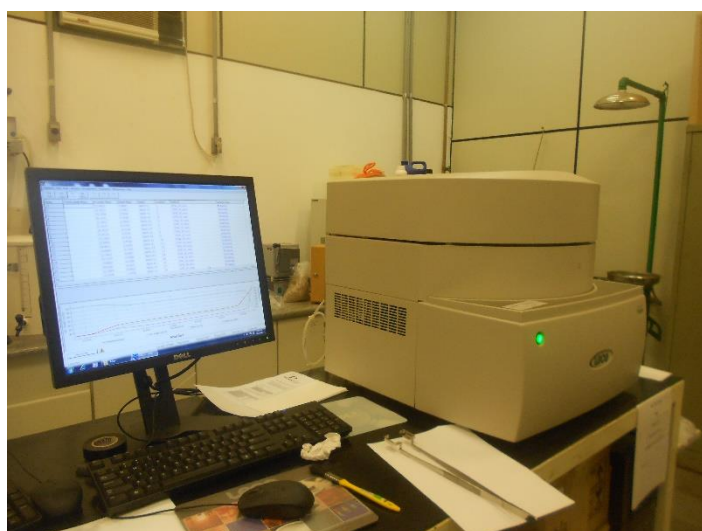
- [29] Y. Chungen, “Mathematical Modelling and Experimental Study of Biomass Combustion in a Thermal 108 MW Grate Fired Boiler”. *Energy & Fuels*, 22, 1380-1390. 2008.
- [30] J. L. Chaney, H. Li, “An overview of CFD modelling of small-scale fixed-bed biomass pellet boilers with preliminary results from a simplified approach”, *Energy Conversion and Management*. 63. 149–156. 2012.
- [31] J. Sui, X. Xu, Bo. Zhang, Ch. Huang. “A Mathematical Model of Biomass Briquette Fuel”, Combustion. *Energy and Power Engineering*, Cap. 5, 1-5. 2013
- [32] H. Beng. “Breeding a better stove: The use of computational fluid Dynamics and Genetic Algorithms to optimise a wood burning stove for Eritrea”. The University of Nottingham School of Mechanical, Materials and Manufacturing engineering. University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. 2008.
- [33] R. Scharler. I. Obernberger. Deriving guidelines for the design of biomass grate furnaces with CFD analysis - a new Multifuel-Low-Nox furnaces as example. Institute of Chemical Engineering Fundamentals and Plant Engineering. Graz University of Technology. Bioenerg. Graz. Austria. 2010.
- [34] T. Jurena. “Energy Considerations in CFD Modelling of Biomass Combustion in an experimental Fixed-Bed Reactor”. *Chemical Engineering Transactions*. Vol 35, 2011.
- [35] Ch. Yin. L. Rosendahl. S. Kaer, “Grate-firing of biomass for heat and power production”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 34. 725-754. 2008.
- [36] F. White, Viscous Fluid Flow, *McGraw-Hill*, Boston, 2010.
- [37] J. C. Guerrero. Evaluación del campo de velocidades y de presiones en un canal de limpieza neumática, con cuerpos en suspensión. Universidad del valle. Departamento de Engenharia Mecânica. Cali, Colômbia. 2010.
- [38] ANSYS-Fluent ® -Solver, Manual, Release 11.0: Modelling. 2011.
- [39] ANSYS-Fluent ®. User's Guide. Inc. Release 11.0: Modelling, 2011.
- [40] C. Aragón. “Análisis de la aplicabilidad de modelos de turbulencia de dinámica computacional de fluidos al cálculo de velocidades en el sistema de ventilación radio-axial de un hidrogenerador de eje vertical con sistema de refrigeración aire – agua”. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería Mecánica. Colombia, Cali. 2008.
- [41] D. C. Wilcox, Turbulence Modeling for CFD. Second Edition. DCW Industries. United States of America. First Printing, July, 1998.
- [42]. J. Tannehill. Computational fluid Mechanics and Heat Transfer. Segunda. Estados Unidos: Taylor & Francis, 1997.
- [43] H. Diaz, J. L. Oslinger. G. A. Jaramillo. “Study and Solution of an overheating problem of a 71,9 MVA generator”. *CIUREE*, Cali, Colombia. 2004.

- [44] J. L. Oslinger, J. A. Palacios, G. A. Jaramillo. “Simplified Virtual Laboratory Experience on Industrial Multiphysics Modeling”. *COMPLAS VIII, CIMNE*, Barcelona, 2005.
- [45] H. S. Fogler, *Elementos de Engenharia das reações químicas*. Terceira edição. University of Michigan. 1999.
- [46] S. McAlister, J. Chen, A. Fernandez, *Fundamentals of Combustion Process*. Mechanical Engineering Series. Springer New York. 2011.
- [47] C. R. Maliska, *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos*, Rio de Janeiro, 2004.
- [48] Y. Yang, Ryu. C., Goodfellow. J., Nasserzadeh. V. e Swithenbank. J. *Modelling Waste Combustion in grate Furnaces*. The university of Sheffield. UK. *Process Safety and Environment Protection*, 82 (B3): 208-22. 2004.
- [49] J. Porteiro, Collazo. J, “Numerical Modeling of a Biomass Pellet Domestic Boiler”. UniVersity of Vigo, *Thermal Engines. Energy & Fuels*, 23, 1067–1075. 2009.
- [50] J. Collazo. Porteiro, J, “Numerical simulation of a small-scale biomass boiler”. UniVersity of Vigo, *Thermal Engines. Energy Conversion and Management* 64 87–96. 2012.
- [51] *Development of generalised model for grate combustion of biomass. Final Report*. Institute of Energy Technolog y Section for Fluidmechanics and Combustion Technology. Aalborg University. 2007.
- [53] Barros, R. W. *Avaliação Teórica e Experimental do Motor Stirling Solo 161 Operando com Diferentes Combustíveis*. Itajubá, Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. 131p. 2005.
- [54] Noguera, A. L. *Análise dos efeitos das condições operacionais de um gaseificador co-corrente de duplo estágio na qualidade do gás*. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Energia. Universidade Federal de Itajubá. Itjúba. Brasil. 2012.
- [55] Majumdar, P. *Computational Fluid Dynamics Analysis of Turbulent Flow*. Department of Mechanical Engineering, Northern Illinois University, Illinois. USA. P. 255-291.2011.

ANEXO 1: Equipamentos do laboratório do NEST



Analizador CHNSO

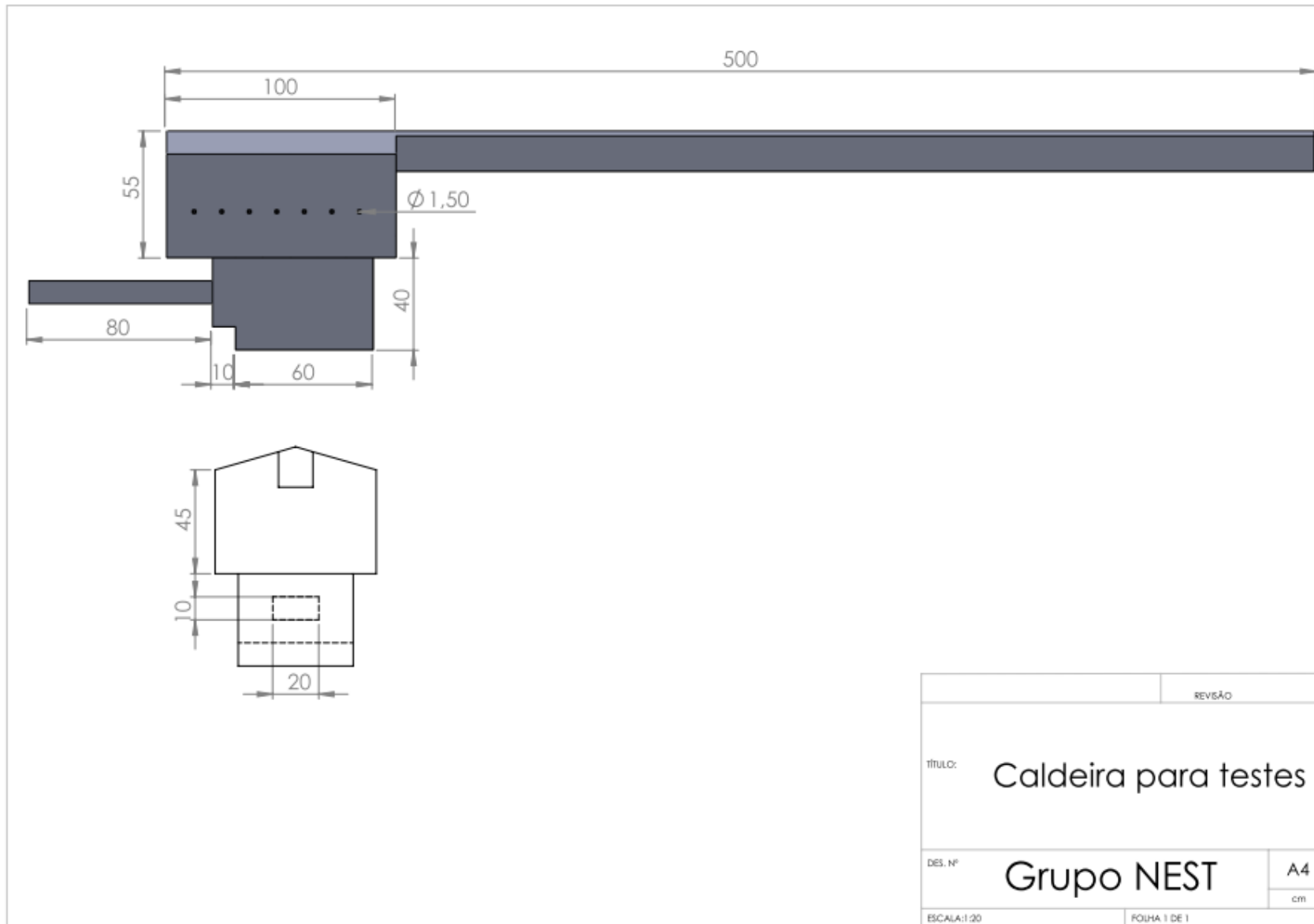


TGA



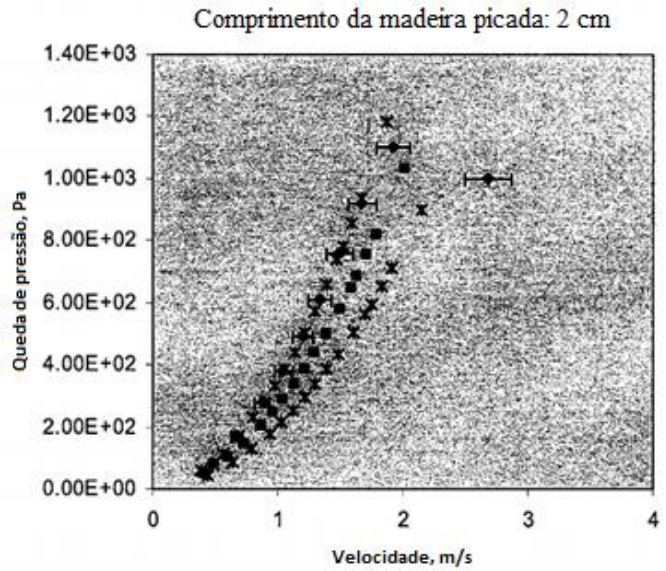
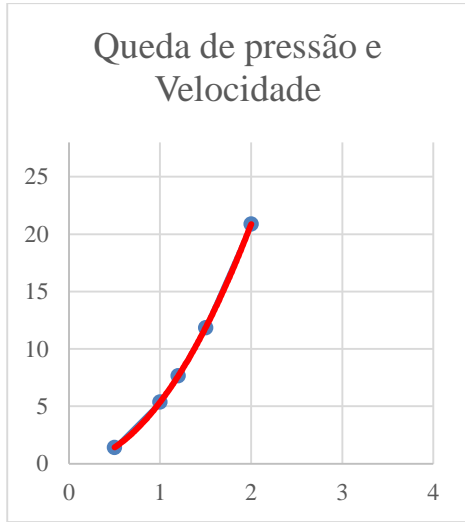
Bomba Calorimétrica

ANEXO 2: Planos da geometria da caldeira.



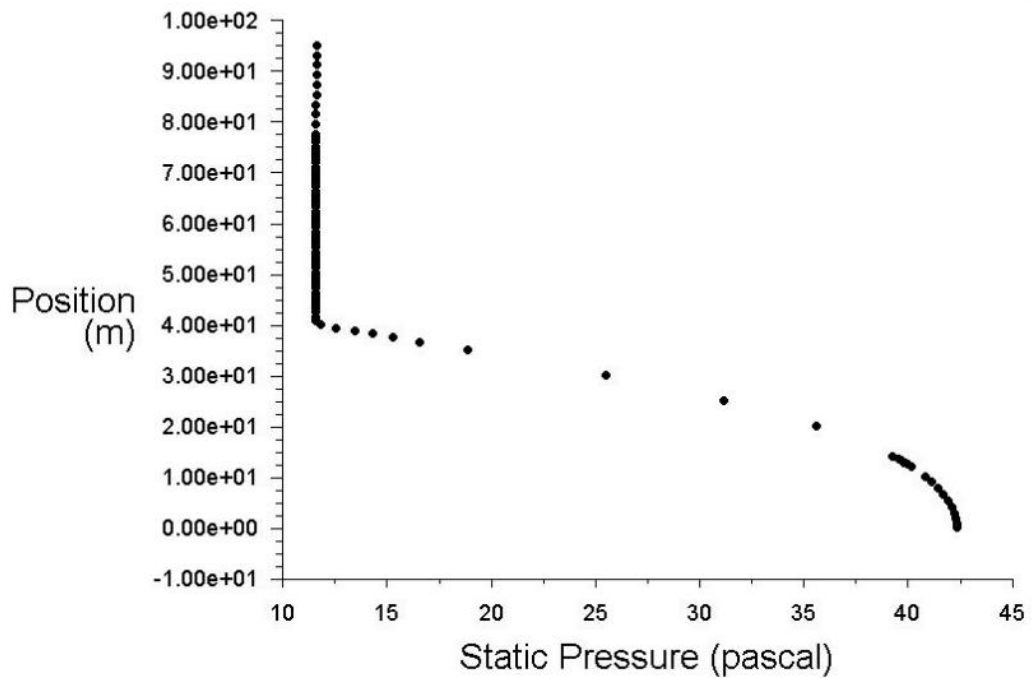
ANEXO 3: Cálculo do meio poroso

Curva característica da queda de pressão no meio poroso na modelagem



Queda de pressão calculada na modelagem através do leito de madeira

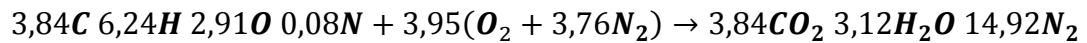
• line-18



ANSYS
14.0

ANEXO 4: Combustão estequiométrica

A equação estequiométrica da combustão do modelado é mostrada na equação 4.1.



Deste modo a relação ar combustível da combustão estequiométrica é:

$$\frac{A}{C} = 5,4197 \frac{kg \ ar}{kg \ comb}$$

Depois de medir a vazão de ar de entrada real se obteve a seguinte relação de ar/combustível:

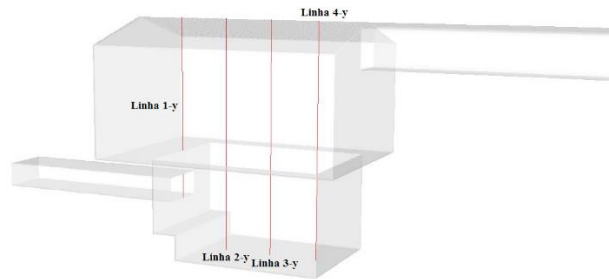
$$\frac{A}{C} = 9,7574 \frac{kg \ ar}{kg \ comb}$$

Onde o coeficiente de ar obtido estimado no teste foi:

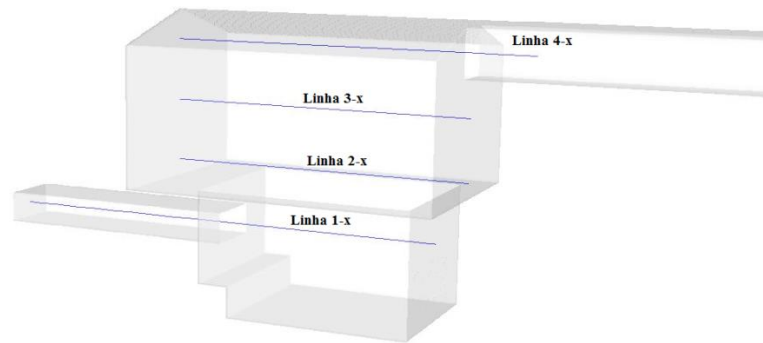
$$\alpha = \frac{ar \ real}{ar \ estiquiométrica} = 1,8$$

ANEXO 5: Resultados nas linhas de análise

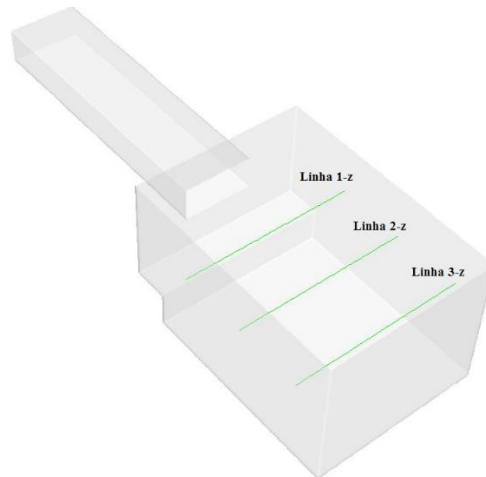
Adicionalmente se criaram linhas de análises dentro da fornalha em diferentes direções



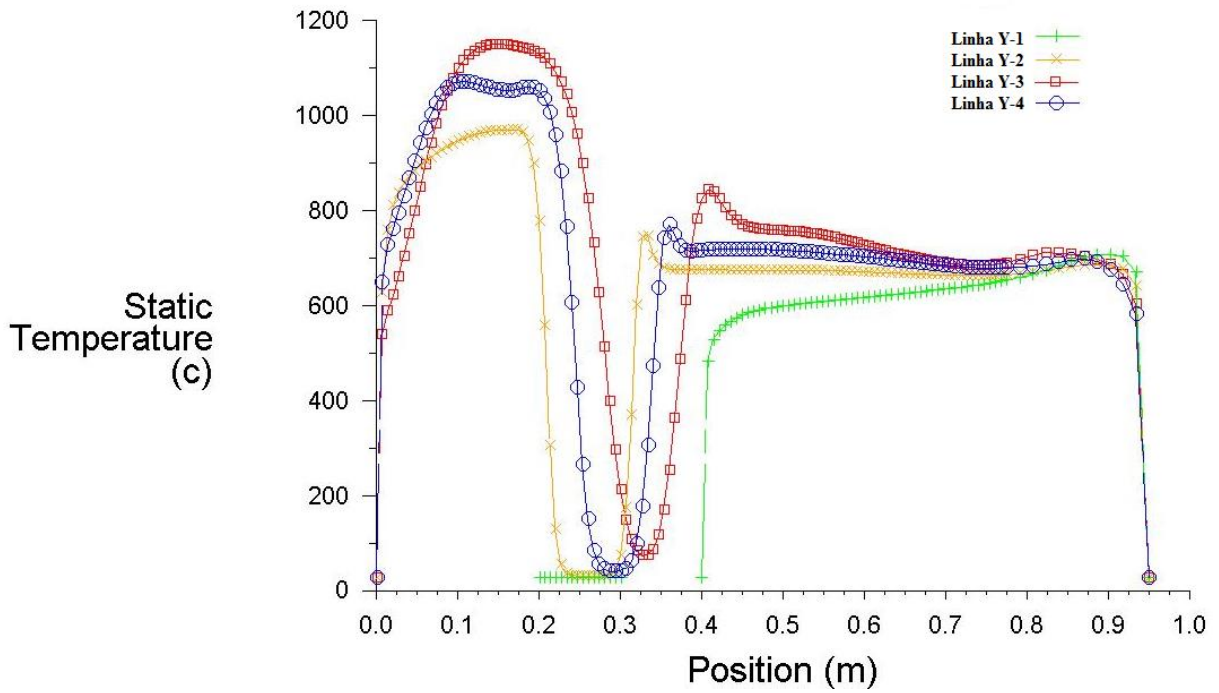
Linhas de análises no eixo Y.



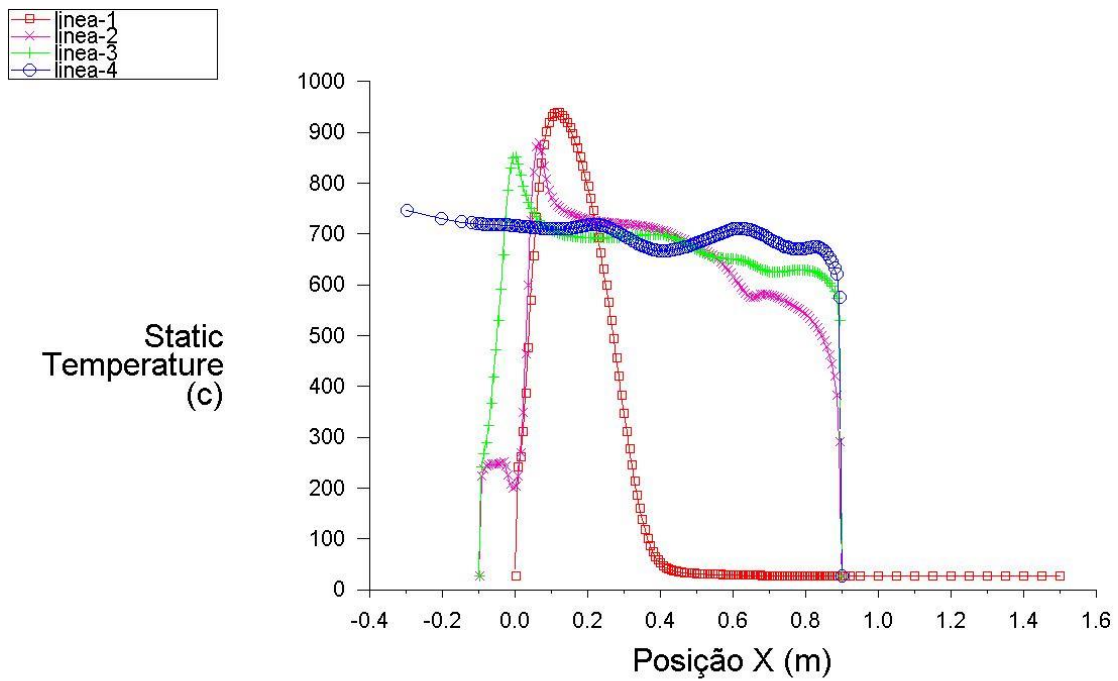
Linhas de análises no eixo X.



Linhas de análises no eixo Z.



Perfil de temperatura nas linhas do eixo Y



Perfil de temperatura nas linhas do eixo X

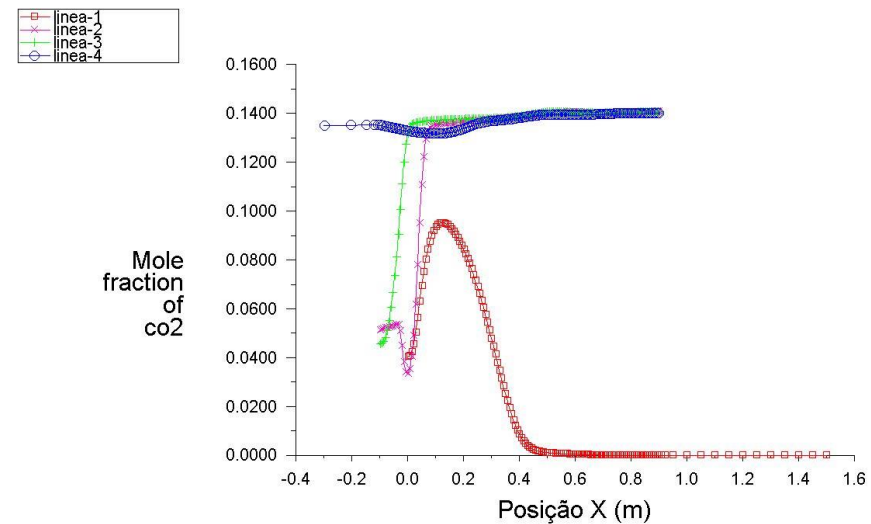
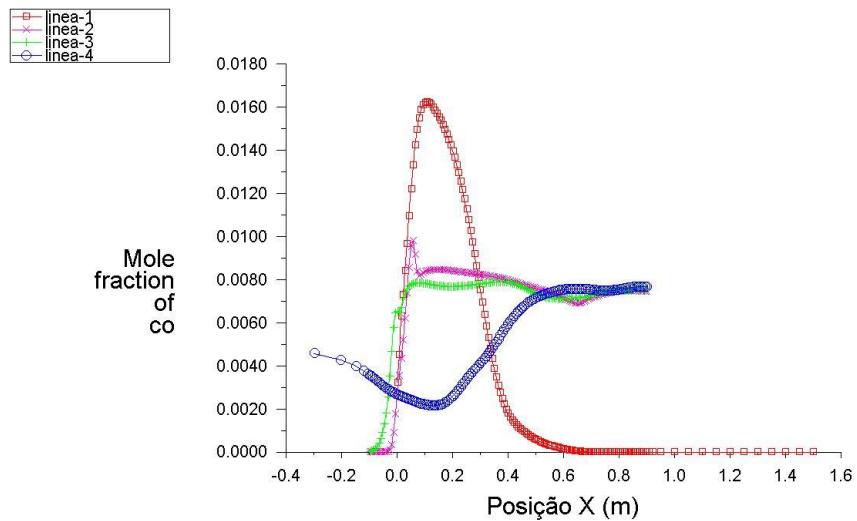
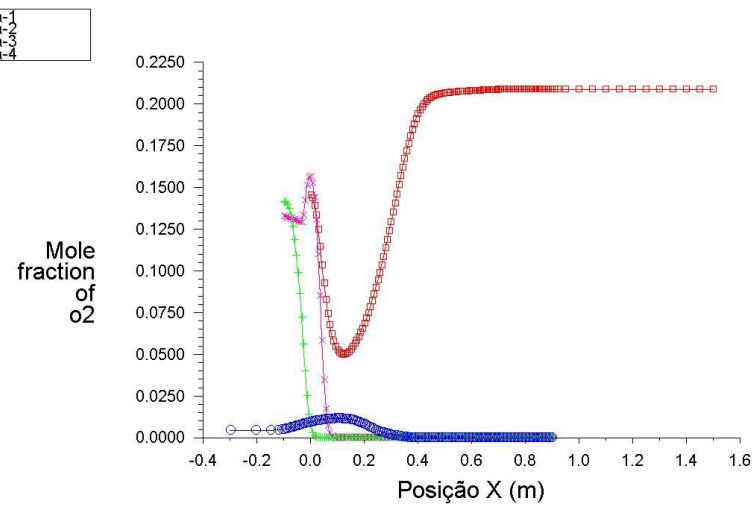
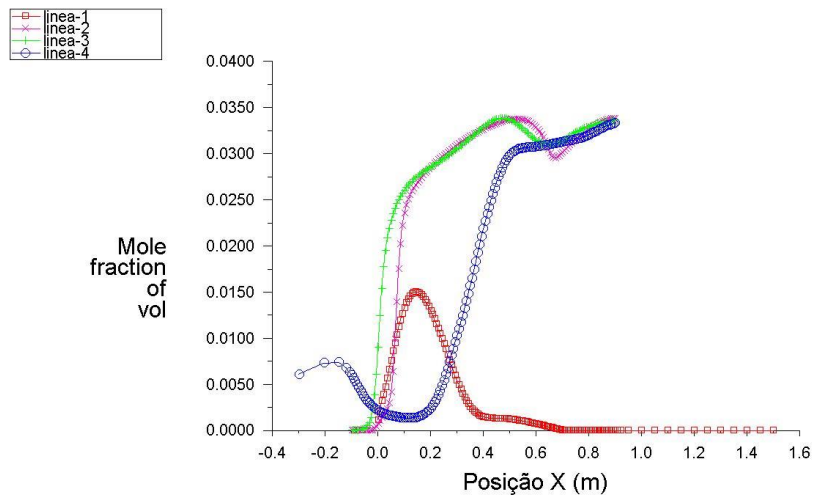
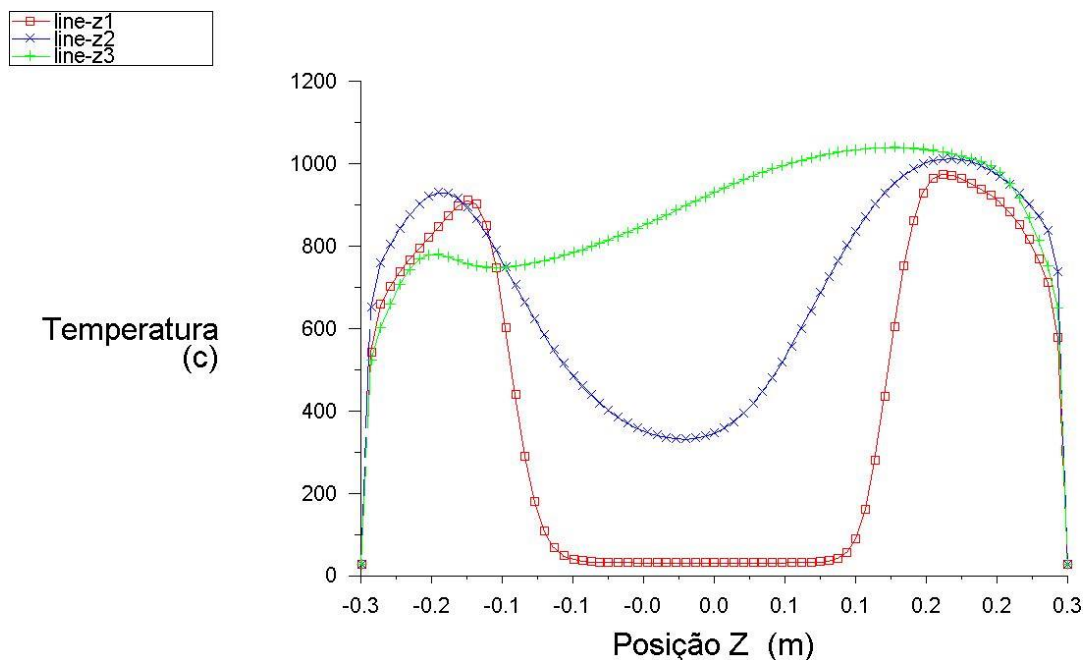


Figura 0.1 Fração molar das espécies nas linhas do eixo X

Note-se que os voláteis aumentam nas linhas 2-x e 3-x justo por encima do leito na câmara de combustão, e diminui na linha 4 na região da saída dos gases à zona de superaquecimento, o O_2 apresenta comportamento contrário aos voláteis os maiores valores foram localizados no leito (entrada de ar) e foi sendo consumido até ser praticamente 0 na cima da fornalha. Comportamento coerente com no esperado e estudado na literatura.

A maior concentração de CO foi produzida no leito e na câmara de combustão, lugar onde ocorre a reação dos voláteis e O_2 . Comparando o comportamento do O_2 e Voláteis com o CO, pode-se ver que a maior produção de CO foi quando a quantidade de O_2 diminui seu valor na linha 1-X, enquanto que os voláteis aumentam sua quantidade na mesma linha, mas as frações molares das ambas espécies são considerável para poder reagir, além disso, o comportamento do ar na nessa zona é muito turbulenta.

O CO_2 produto da queima do char apresenta a maiores concentrações na saída dos gases à zona de superaquecimento, mas pode se ver que sua quantidade vai aumentando à medida que vai aumentado à distância desde a grelha.



Perfil de temperatura nas linhas do eixo Z

O comportamento é o suposto depois de ver as análises anteriores, a temperatura vai diminuindo desde a entrada de ar até a linha próxima da parede posterior no leito, mas pode-se notar que

tem maiores temperaturas nos costados do leito, lugar onde tinha maiores concentrações de voláteis e onde se liberada o calor produto da queima do char, além a velocidade é menor que nas outras regiões dentro do leito.

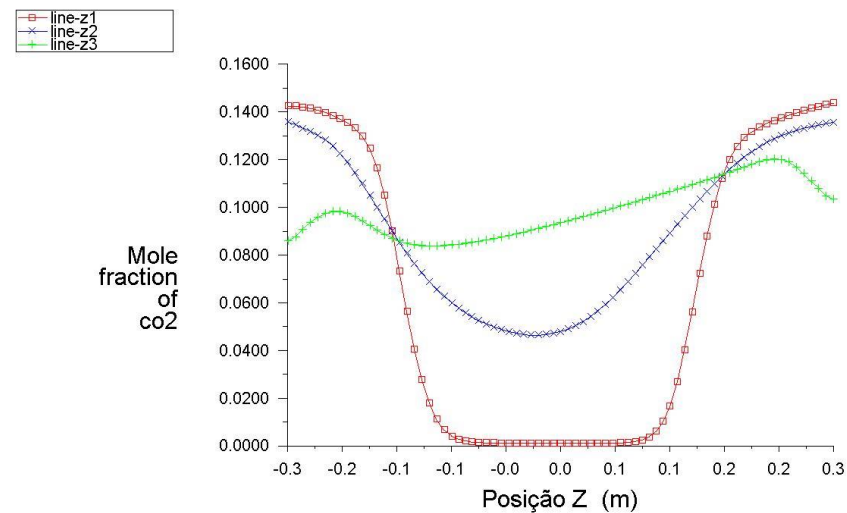
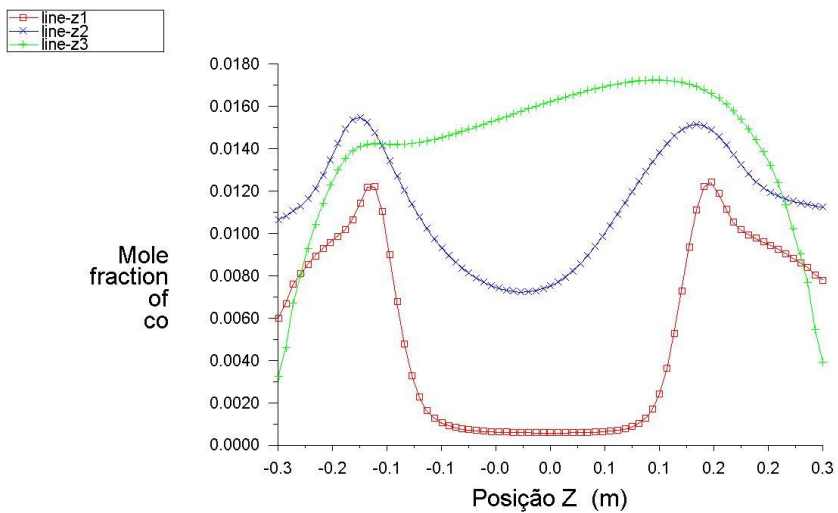
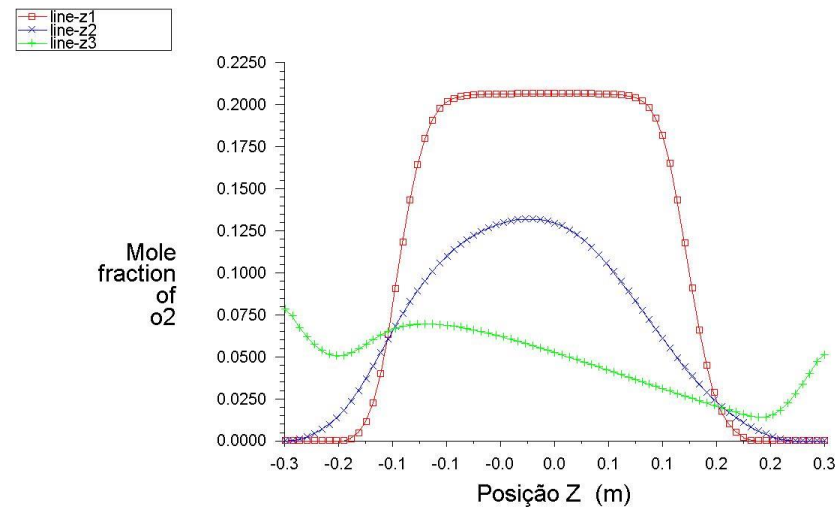
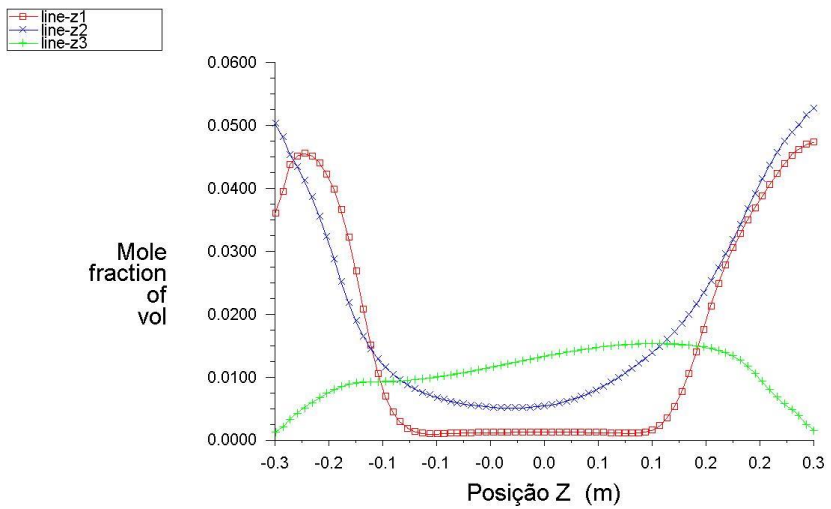


Figura 0.2 Fração molar das espécies nas linhas do eixo Z

Note-se que o comportamento das espécies é baseado nas mesmas considerações que as anteriores análises, a maior concentração de voláteis encontra-se em nas regiões perto das paredes e aumenta onde a velocidade do ar se reduz, enquanto que a concentração do O_2 aumenta no centro do leito e vai diminuindo da linha 1 até a linha 3.

As maiores concentrações de CO são localizadas na linha 3 perto da parede posterior do leito onde há concentrações de O_2 e voláteis consideráveis, além de formar-se as maiores turbulências.

As maiores concentrações de CO_2 foram localizadas nos costados do leito.