

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**FELIPE DE AGUIAR DE LINHARES**

**Avaliação Fluidodinâmica e Processo de Co-combustão de Resíduo  
de Casca de Acácia Negra com Carvão Mineral em Planta Piloto de  
Leito Fluidizado Borbulhante**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Porto Alegre, 2016**



**FELIPE DE AGUIAR DE LINHARES**

**Avaliação Fluidodinâmica e Processo de Co-combustão de Resíduo  
de Casca de Acácia Negra com Carvão Mineral em Planta Piloto de  
Leito Fluidizado Borbulhante**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química. Área de concentração: Fenômenos de Transportes e Operações Unitárias

Orientador: Prof. Dr. Nilson Romeu Marcilio  
Coorientador: Prof. Dr. Pedro Juarez Melo

**Porto Alegre, 2016**



**FELIPE DE AGUIAR DE LINHARES**

**Avaliação Fluidodinâmica e Processo de Co-combustão de Resíduo de Casca de Acácia Negra com Carvão Mineral em Planta Piloto de Leito Fluidizado Borbulhante**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química. Área de concentração: Fenômenos de Transportes e Operações Unitárias.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Evandro Steffani – DEQUI/UFRGS

---

Dr. Guilherme de Souza – Pesquisador CIENTEC

---

Prof. Dr. Leandro Dalla Zen - UNISINOS



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Juarez Linhares e Alzira de Aguiar, e a pessoa muito especial, Cristina L. Ferreira por todo o apoio estando sempre ao meu lado e por tornarem tudo isso possível.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Nilson Romeu Marcilio e Prof. Dr. Pedro Juarez Melo, pela oportunidade, paciência, orientação e pela confiança no meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Gabriel M. Faé Gomes, pelo acompanhamento em todas as etapas do trabalho, compartilhando seus conhecimentos e sua experiência na área da pesquisa.

À Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC) que possibilitou a realização deste trabalho na unidade industrial de Cachoeirinha.

Ao CNPq, pela bolsa de mestrado.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química (PPGEQ) da UFRGS.

Aos amigos, colegas do Laboratório de Processamento de Resíduos (LPR) e a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.





## RESUMO

A preservação ambiental e o uso de combustíveis fósseis para geração de energia têm estimulado a realização de pesquisas na busca de alternativas para a redução das emissões de gases poluentes como CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. O uso da biomassa em sistemas de co-combustão em leito fluidizado é mencionado como uma destas alternativas. O presente trabalho utilizou biomassa residual da indústria de extração de tanino, o Resíduo de Cascas de Acácia Negra (RCAN), em conjunto com carvão mineral da Mina de Candiota – RS com o objetivo de estudar a fluidodinâmica entre diferentes composições destes materiais em sistema de leito fluidizado com areia em escala de laboratório e em uma unidade piloto. Também foi realizada a avaliação dos parâmetros operacionais e das emissões dos gases gerados na co-combustão das misturas em planta piloto com reator de leito fluidizado borbulhante. Durante a fluidização no sistema de escala laboratorial, os valores da velocidade mínima de fluidização,  $U_{mf}$ , variaram consideravelmente com o aumento da concentração de RCAN no leito em relação à fluidização utilizando-se somente o carvão mineral. Da mesma forma, a queda de pressão,  $\Delta P$ , diminuiu com o aumento da concentração da biomassa no leito. Nas operações de co-combustão em planta piloto, as misturas de carvão mineral e RCAN necessitaram de menores porcentagens de excesso de ar (99,7% a 65,2%) no reator em comparação à queima apenas de carvão mineral (108,4% a 107,5%) para que se atingisse a temperatura de operação do leito. Em particular, a condição de maior quantidade de biomassa na alimentação pode se observar a menor porcentagem de excesso de ar (50,8%). Ainda, a co-combustão do RCAN com carvão mineral favoreceu a diminuição das concentrações de SO<sub>2</sub> nos gases gerados em mais de 90%, mantendo as emissões em níveis aceitáveis conforme os limites de emissão estabelecidos pela resolução CONAMA Nº 436, de 22/12/2011 e Resolução SEMA Nº 016 de 2014.

**Palavras-chave:** biomassa; fluidização; co-combustão; acácia negra; carvão mineral

## ABSTRACT

The environmental issues brought by the use of fossil fuels for power generation have led to the development of research in the exploration for alternatives to reduce emissions of greenhouse gases or pollutants such as CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub>. The biomass use in cofiring systems with fluidized bed has been mentioned as one of these alternatives. The present work used biomass waste from tannin extraction industry, Black Wattle Bark Waste (BWBW), jointly with coal for the purpose of studying the fluid dynamics biomass mixtures with coal and sand in different proportions of the materials in laboratory scale fluidized bed system. Also, operational parameters and emissions generated in a cofiring pilot plant with bubbling fluidized bed reactor were evaluated. The fluidization tests performed on a bench scale showed that the values of the minimum fluidization velocity,  $U_{mf}$ , varied considerably with increasing concentration of BWBW compared with the fluidization of coal. Likewise, the pressure drop through the bed,  $\Delta P$ , decreased with increasing concentration of biomass in the bed. In the cofiring operations, coal and mixtures BWBW required smaller percentages of excess air in the reactor (99,7% a 65,2%) in comparison with the pure coal (108,4% a 107,5%) burning to obtaining the bed operating temperature. The burning of the mixture with higher amounts of biomass in the reactor feed had the lowest percentage of excess air (50.8%). It was also evidenced a decrease of SO<sub>2</sub> generation in more than 90% for the flue gas generated in the coal with BWBW cofiring keeping emissions at acceptable levels in comparison with emission limits of current legislation CONAMA N° 436, from 22/12/2011 and legislation SEMA N° 016 of 2014.

**Keywords:** Biomass; fluidization; co-firing; black wattle; mineral coal

## SUMÁRIO

|  |      |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS .....   | ix   |
| LISTA DE TABELAS .....   | xii  |
| LISTA DE SÍMBOLOS.....   | xiii |
| LISTA DE ABREVIATURAS.....                                       | xv   |
| 1 INTRODUÇÃO .....   | 1    |
| 2 OBJETIVOS .....  | 5    |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                                     | 6    |
| 3.1 Matriz Energética do Brasil.....                             | 6    |
| 3.2 Biomassa.....  | 9    |
| 3.2.1 Características da biomassa .....                          | 9    |
| 3.2.2 Conversão energética .....                                 | 11   |
| 3.2.3 Biomassa no Brasil.....                                    | 13   |
| 3.2.3.1 Resíduos de Casca de Acácia Negra (RCAN) .....           | 14   |
| 3.2.4 Disponibilidade energética dos RCAN .....                  | 15   |
| 3.3 Carvão Mineral .....   | 17   |
| 3.4 Co-combustão .....   | 19   |
| 3.4.1 Propriedades dos combustíveis .....                        | 19   |
| 3.4.1.1 Composição química elementar .....                       | 19   |
| 3.4.1.2 Composição química imediata .....                        | 20   |
| 3.4.1.3 Poder calorífico .....                                   | 20   |
| 3.4.2 Definições e reações de combustão .....                    | 21   |
| 3.4.3 Ar de combustão e excesso de ar .....                      | 22   |
| 3.4.4 Análise energética de sistemas de combustão .....          | 25   |
| 3.4.5 Vantagens e desvantagens do processo de co-combustão ..... | 27   |
| 3.5 Fluidização .....  | 28   |
| 3.5.1 Comportamento fluidodinâmico dos materiais sólidos .....   | 28   |
| 3.5.2 Velocidade mínima de fluidização .....                     | 30   |
| 3.5.3 Diagrama de Geldart.....                                   | 33   |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.5.4 | Reatores de leito fluidizado .....   | 35 |
| 3.5.5 | Vantagens e desvantagens dos leitos fluidizados .....  | 36 |
| 3.6   | Aplicações do processo de co-combustão em leito fluidizado .....                                       | 38 |
| 3.7   | Controle de emissões .....   | 41 |
| 3.8   | Caracterização das cinzas .....  | 42 |
| 4     | MATERIAIS E MÉTODOS .....  | 45 |
| 4.1   | Materiais .....  | 45 |
| 4.1.1 | Caracterização dos combustíveis .....  | 45 |
| 4.1.2 | Propriedades físicas dos materiais .....   | 46 |
| 4.2   | Métodos experimentais .....  | 47 |
| 4.2.1 | Sistema de fluidização em escala de bancada .....  | 47 |
| 4.2.2 | Processo de co-combustão em planta piloto .....  | 49 |
| 4.2.3 | Balanço de massa, determinação do ar estequiométrico e excesso de ar no processo de co-combustão ..... | 52 |
| 4.2.4 | Balanço de energia no reator .....   | 54 |
| 4.2.5 | Análise dos gases .....  | 56 |
| 4.2.6 | Caracterização das cinzas .....  | 57 |
| 5     | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 59 |
| 5.1   | Análise imediata, análise elementar e poder calorífico .....   | 59 |
| 5.2   | Análise termogravimétrica (TGA) .....  | 60 |
| 5.3   | Propriedades físicas dos materiais .....   | 62 |
| 5.4   | Velocidade mínima de fluidização “ $U_{mf}$ ” das misturas .....                                       | 62 |
| 5.5   | Co-combustão e parâmetros de operação da planta piloto .....   | 67 |
| 5.6   | Balanço de energia no sistema de planta piloto .....   | 68 |
| 5.7   | Emissões de $SO_2$ , $NO_x$ , e CO .....   | 73 |
| 5.8   | Caracterização das cinzas .....  | 75 |
| 6     | CONCLUSÕES .....   | 79 |
| 7     | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....   | 81 |
|       | REFERÊNCIAS .....  | 82 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> - Número de artigos científicos publicados na base de dados do Science Direct utilizando os termos “Biomass”, “Fluidized bed”, “Biomass co-firing” e “Black Wattle”.....  | 3  |
| <b>Figura 2</b> - Participação de fontes renováveis e não renováveis na matriz energética brasileira, mundial e países da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico). ....  | 6  |
| <b>Figura 3</b> - Oferta interna de energia no Brasil em 2014.....  | 7  |
| <b>Figura 4</b> - Oferta interna de energia elétrica no Brasil. ....  | 8  |
| <b>Figura 5</b> - Tecnologias de conversão de biomassa. ....  | 11 |
| <b>Figura 6</b> - Estimativa do potencial de geração de energia a partir de resíduos da silvicultura na Região Sul do Brasil. ....  | 14 |
| <b>Figura 7</b> - Localização dos principais depósitos minerais de carvão no estado do Rio Grande do Sul. ....  | 18 |
| <b>Figura 8</b> - Esquema da análise energética do processo de combustão. ....  | 26 |
| <b>Figura 9</b> - Perdas de calor em caldeiras. ....  | 26 |
| <b>Figura 10</b> - Tipos de escoamentos em leito fluidizado.....  | 29 |
| <b>Figura 11</b> - Comportamento fluidodinâmico dos escoamentos em leito fluidizado. ...  | 30 |
| <b>Figura 12</b> - Comportamento da curva $\Delta p$ versus $U$ para um leito com partículas médias e de tamanho uniforme. ....   | 33 |
| <b>Figura 13</b> – Diagramada classificação de partículas de Geldart para fluidização gás-sólido.....   | 34 |
| <b>Figura 14</b> - Tipos de reatores para combustão em (a) Leito Fixo, (b) RLFB e RLFC. ....  | 36 |
| <b>Figura 15</b> – Diagrama de processo de combustão em leito fluidizado. ....  | 39 |
| <b>Figura 16</b> - (a) Resíduo de Casca de Acácia Negra (RCAN), (b) Carvão Candiota e (c) Areia do lastro do leito fluidizado. ....   | 47 |
| <b>Figura 17</b> - Sistema de fluidização de bancada (a) e imagem do fluidizador (b). ....  | 48 |
| <b>Figura 18</b> - Fluxograma do sistema de co-combustão da unidade piloto da CIENTEC: (1) silo de carvão, (2) silo de biomassa, (3) e (4) transportadores de sólidos tipo roscas sem fim, (5) reator de leito fluidizado, (6 e 8) ciclones, (7) trocador de calor, (9) ventilador de tiragem forçada. .... | 49 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 19</b> - Foto do reator de leito fluidizado borbulhante. ....   | 50 |
| <b>Figura 20</b> - Calibração da rosca de alimentação com RCAN. ....  | 51 |
| <b>Figura 21</b> - Calibração da rosca de alimentação com carvão mineral. ....  | 51 |
| <b>Figura 22</b> - Representação do volume de controle considerado para a combustão e co-combustão dos combustíveis com ar atmosférico. ....  | 52 |
| <b>Figura 23</b> - Representação do volume de controle com entrada e saída de fluxos de energia do leito fluidizado. ....   | 54 |
| <b>Figura 24</b> – Analisador de gases. ....  | 57 |
| <b>Figura 25</b> - Análise termogravimétrica (TGA) do carvão Candiota e biomassa RCAN. ....   | 61 |
| <b>Figura 26</b> - Queda de pressão ( $\Delta P$ ) versus velocidade superficial de ar ( $U_s$ ) para os testes em escala de bancada para diferentes composições, sendo: (a) RCAN e Areia, (b) Carvão e Areia, (c) 70% Carvão : 30% RCAN, (d) 50% Carvão:50% RCAN e (e) 30% Carvão : 70% RCAN. trocar ..... | 63 |
| <b>Figura 27</b> - Velocidade mínima de fluidização ( $U_{mf}$ ) em função da porcentagem dos compostos RCAN e Carvão, e das misturas 70% Carvão:30% RCAN, 50% Carvão:50% RCAN e 30% Carvão:70% RCAN aplicadas aos testes no leito fluidizado de bancada. ....  | 65 |
| <b>Figura 28</b> - Imagem dos leitos com (a) detalhe da disposição da biomassa e (b) leito totalmente fluidizado ambos para RCAN e Areia durante testes no sistema de bancada. ....   | 66 |
| <b>Figura 29</b> - Queda de pressão ( $\Delta P$ ) versus velocidade superficial ( $U_s$ ) para teste no sistema planta piloto de leito fluidizado borbulhante. ....  | 66 |
| <b>Figura 30</b> - Calor gerado nas operações de combustão e co-combustão e porcentagem de biomassa aplicada nas operações. ....  | 69 |
| <b>Figura 31</b> - Calor gerado por kg de combustível alimentado no reator e excesso de ar aplicado nas operações 01 a 07. ....   | 70 |
| <b>Figura 32</b> - Entalpias relativas aos componentes do ar e dos gases de combustão na saída do volume de controle para as operações 01 e 07. ....  | 72 |
| <b>Figura 33</b> - Concentrações de $SO_2$ , $NO_x$ e CO nos gases de saída da planta piloto de co-combustão em leito fluidizado. ....  | 73 |

**Figura 34** - Difractogramas de raios-X das cinzas de combustão do carvão e da co-combustão de carvão Candiota e RCAN, sendo: S ( $\text{SiO}_2$ ); H ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); C1 ( $\text{CaSO}_4$ ); C2 ( $\text{CaSO}_3$ ); C3 ( $\text{CaO}$ ); C4 ( $\text{CaCO}_3$ ); M ( $\text{KAl}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) e P ( $\text{MgO}$ ).....77

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1</b> - Propriedades físicas e químicas típicas de biomassa e carvão mineral. ...  | 10 |
| <b>Tabela 2</b> - Geração de Resíduos de Casca de Acácia Negra ( $Q_{RCAN}$ ) e Potencial Energético Disponível dos Resíduos de Acácia Negra ( $PD_{RCAN}$ ). .....                        | 16 |
| <b>Tabela 3</b> – Capacidade média instalada de unidades que utilizam carvão mineral e resíduos florestais. ....   | 16 |
| <b>Tabela 4</b> - Valores usuais do coeficiente de excesso de ar. ....   | 24 |
| <b>Tabela 5</b> - Limites de emissão de $SO_x$ , $NO_x$ , e CO segundo resolução do CONAMA n.436, de 22/12/2011. ....  | 42 |
| <b>Tabela 6</b> - Análise imediata, análise elementar, poder calorífico inferior (PCI) e normas experimentais aplicadas ao resíduo de casca de acácia negra (RCAN) e carvão Candiota. .... | 59 |
| <b>Tabela 7</b> - Valores ajustados das frações mássicas em base úmida do RCAN e carvão utilizados nos cálculos dos balanços de massa no reator. ....                                      | 60 |
| <b>Tabela 8</b> - Diâmetros e massas específicas dos materiais. ....   | 62 |
| <b>Tabela 9</b> - Velocidade mínima de fluidização ( $U_{mf}$ ) dos materiais e das suas misturas durante os testes em leito fluidizado em escala de bancada. ....                         | 64 |
| <b>Tabela 10</b> - Condições operacionais das operações em planta piloto de combustão. ....  | 67 |
| <b>Tabela 11</b> - Poder calorífico inferior em base como recebida e umidade dos combustíveis. ....  | 68 |
| <b>Tabela 12</b> - Balanço de energia para a operação 01 e para a operação 07 no reator de leito fluidizado borbulhante. ....  | 71 |
| <b>Tabela 13</b> - Sequência de temperaturas de amolecimento, deformação e fusão das cinzas do carvão, RCAN e suas misturas. ....  | 78 |



## LISTA DE SÍMBOLOS

|             |  |
|-------------|--|
| $Ar$        | Número de Arquimedes                                 |
| $d_p$       | Diâmetro médio das partículas                        |
| $g$         | Aceleração da gravidade                              |
| $H_{mf}$    | Altura do leito para o estado de mínima fluidização  |
| $\phi_s$    | Fator de esfericidade dos sólidos                    |
| $D_v$       | Diâmetro médio de Sauter                             |
| $d_i$       | Diâmetro da malha da peneira i                       |
| $H$         | Entalpia   |
| $h$         | Entalpia específica                                  |
| $kg$        | Quilograma   |
| $kJ$        | Quilojoule   |
| $kcal$      | Quilocaloria   |
| $kPa$       | Quilopascal  |
| $m^3$       | Metro cúbico   |
| $MJ$        | Megajoule  |
| $MW_e$      | Megawatt elétrico                                    |
| $MW_t$      | Megawatt térmico                                     |
| $\dot{m}_i$ | Vazão mássica do componente i                        |
| $\dot{n}_i$ | Taxa molar do componente i                           |
| $Q_2$       | Perdas com gases de combustão                        |
| $Q_3$       | Perdas por combustão incompleta                      |
| $Q_4$       | Perdas ao meio ambiente (radiação e convecção)       |
| $Q_5$       | Perdas de calor pelas cinzas                         |
| $Q_d$       | Calor Disponível                                     |
| $Q_{ec}$    | Energia Absorvida no Economizador                    |
| $Q_{sa}$    | Energia Absorvida no Superaquecedor                  |
| $Re$        | Número de Reynolds                                   |
| $Re_{mf}$   | Número de Reynolds em condição de mínima fluidização |
| $t$         | Tonelada   |
| $U$         | Velocidade superficial do Ar                         |

|                    |   |
|--------------------|---|
| $U_{mf}$           | Velocidade de Mínima Fluidização                        |
| $U_{tr}$           | Velocidade Terminal ou de Arraste                       |
| $x_{aci}$          | fração de material acumulado na peneira i               |
| $X_i$              | Fração molar do componente i                            |
| $Y_i$              | Fração mássica do componente i                          |
| $T_{ref}$          | Temperatura de referência                               |
| $\mu$              | Viscosidade dinâmica do fluido                          |
| $\rho_g$           | Massa específica do fluido                              |
| $\rho_p$           | Massa específica dos sólidos                            |
| $^{\circ}C$        | Grau Celsius  |
| $\Sigma$           | Somatório   |
| $\varepsilon$      | Porosidade do leito                                     |
| $\varepsilon_{mf}$ | Porosidade do leito para o estado de mínima fluidização |
| $\mu m$            | Micrômetro  |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|             |   |
|-------------|---|
| ANEEL       | Agência Nacional de Energia Elétrica                                  |
| ASTM        | American Society for Testing and Materials                            |
| Atm         | Atmosfera   |
| BEN         | Balanço Energético Nacional   |
| CIENTEC     | Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul       |
| CONAMA      | Conselho Nacional do Meio Ambiente                                    |
| CONSEMA     | Conselho Estadual do Meio Ambiente                                    |
| $G_{RCAN}$  | Geração Anual de Resíduos de Casca de Acácia Negra                    |
| IBGE        | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                       |
| MV          | Matéria Volátil   |
| OCDE        | Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico             |
| P           | Pressão estática  |
| PCI         | Poder Calorífico Inferior   |
| $PCI_{bcr}$ | Poder Calorífico Inferior em base como recebida                       |
| $PCI_{au}$  | Poder Calorífico Inferior ajustado a umidade                          |
| PCS         | Poder Calorífico Superior   |
| $PD_{RCAN}$ | Potencial Energético Disponível dos Resíduos de Casca de Acácia Negra |
| PGRS        | Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos                            |
| RCAN        | Resíduos de Casca de Acácia Negra                                     |
| RLFB        | Reator de Leito Fluidizado Borbulhante                                |
| RLFC        | Reator de Leito Fluidizado Circulante                                 |
| SEMA        | Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos              |
| UFRGS       | Universidade Federal do Rio Grande do Sul                             |
| VC          | Volume de controle  |



## 1 INTRODUÇÃO

Crescentes preocupações sobre os impactos ambientais que envolvem a geração de energia a partir da queima de combustíveis não renováveis, como petróleo e carvão, estão favorecendo o desenvolvimento de novas tecnologias. Estas tecnologias visam mitigar as emissões atmosféricas e viabilizar o uso destas fontes não renováveis de energia de maneira sustentável.

O uso da biomassa na co-combustão com carvão mineral tem sido mencionado em muitas pesquisas como um dos principais meios de geração sustentável utilizando combustíveis sólidos. Publicações recentes mostram que a geração de vapor para produção termelétrica tem utilizado combustores ou reatores de leitos fluidizados para queima de misturas de combustíveis sólidos. As pesquisas indicam que esta tecnologia é eficiente para o processo de co-combustão devido a características como flexibilidade, estabilidade e eficiência destes tipos de equipamentos (KHAN et al., 2009).

Para a produção de energia, entende-se por biomassa os materiais que apresentam fração biodegradável de produtos ou resíduos provenientes da agricultura, silvicultura, resíduos industriais ou urbanos e que possam ser utilizados como combustíveis (ARAÚJO, 2008). Quimicamente, a biomassa é constituída principalmente de materiais orgânicos com composição polimérica, tal como a celulose, hemicelulose e lignina, as quais variam de material para material (IDEIAS, 2008). Ao contrário do carvão mineral, materiais de biomassa têm alto percentual de conteúdo volátil e de umidade. Também possuem uma combustão rápida e requerem temperaturas de ignição inferiores às do carvão mineral (AL-SHEMMERI; YEDLA; WARDLE, 2015).

Assim, um dos benefícios da utilização de biomassa em processos de combustão, substituindo parcialmente ou integralmente os combustíveis fósseis, é a diminuição das emissões dos gases causadores do efeito estufa. Este fato é atribuído a um balanço nulo nas emissões de CO<sub>2</sub>, quando se queima a biomassa pura, pois há uma relação direta do dióxido de carbono liberado para a atmosfera e a quantidade que foi absorvida da atmosfera através de fotossíntese pela vegetação (ABELHA, 2005). Outro benefício que se verifica no uso da biomassa é um efeito

sinérgico durante a co-combustão associado ao alto teor de material volátil da biomassa. Esta característica fornece uma chama mais estável para o combustível misto no reator (VASSILEV et al., 2013). Em estudos mais recentes, Vassilev et al. (2015) mencionam dois aspectos importantes que devem ser bem conhecidos para a utilização de biomassa em processos de co-combustão: (i) ampliar e melhorar os conhecimentos básicos sobre a composição e propriedades destes materiais, e (ii) aplicar esses conhecimentos para utilização adequada e sustentável da biomassa.

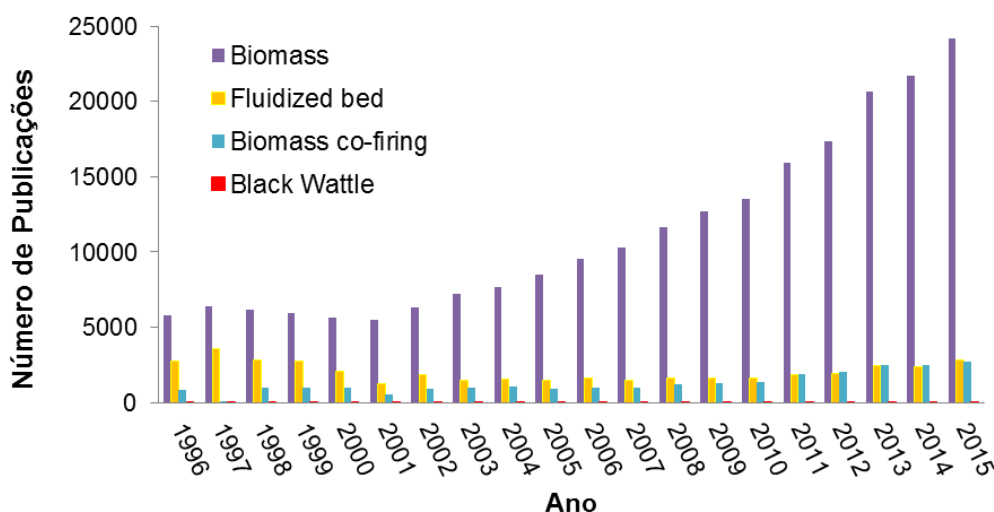
A disponibilidade de biomassa e a sua utilização como fonte de energia têm aumentado nos últimos anos. No Brasil, são geradas grandes quantidades anuais de resíduos orgânicos com potencial para produção de energia, tais como bagaço de cana de açúcar, cascas de arroz, cascas de acácia negra e outros. Como exemplo, somente no estado do Rio Grande do Sul existe uma elevada produção de cascas de Acácia Negra (*Acacia mearsii De Wild*) que é utilizada pela indústria de produção do tanino. O cultivo da Acácia Negra, uma leguminosa não nativa do Brasil, atende a produção de madeira e a extração do tanino presente na casca desta árvore (FENG et al., 2013; PERES et al., 2015). No processo de extração do tanino é gerada grande quantidade de Resíduos de Casca de Acácia Negra (RCAN), os quais são destinados à compostagem orgânica, combustão em caldeiras ou dispostos em aterros causando elevados custos às empresas produtoras. No ano de 2012, foram produzidas cerca de 103 mil toneladas de casca de acácia negra no Estado, totalizando quase 100% da produção nacional. A projeção para o ano de 2016 é superior a 150 mil toneladas do resíduo (IBGE, 2016).

Muitos autores estudaram a utilização de diferentes tipos de biomassa na co-combustão com carvão mineral em sistemas de leito fluidizado. Nestes trabalhos muitos parâmetros têm sido analisados, tais como: características da combustão, fluidodinâmica, segregação do leito, emissões atmosféricas e características das cinzas formadas (DUMORTIER, 2013; GOLDFARB & CEYLAN, 2015; KUMAR et al., 2015; KUPRIANOV et al., 2006; NUNES et al., 2014; RUHUL & KUMAR 2012). Ainda, pesquisas apontam que misturas de carvão com até 20% de biomassa são atualmente possíveis, e que misturas com mais de 50% de biomassa estão sendo estudadas para serem utilizadas nos processos de co-combustão aplicados à geração de energia. O uso de biomassa utilizada em unidades já instaladas e que

foram projetadas para queima de carvão é relativamente baixo e não ultrapassam 10% em massa na alimentação destes sistemas (SAHU et al., 2014).

A produção científica nas áreas que utilizam biomassa como matéria prima, assim como estudos de leitos fluidizados e de co-combustão de materiais são apresentados na Figura 1, que relaciona o número de artigos publicados nos últimos 20 anos, com os termos pesquisados, “*Biomass*”, “*Fluidized bed*”, “*Biomass co-firing*” e “*Black Wattle*”. Na referida figura observa-se um crescente e elevado número de publicações na área de biomassa a partir do ano de 2001, chegando próximo de 25 mil publicações em 2015. A tecnologia de leito fluidizado já é bem consolidada e vem sendo estudada desde a década de 30, como por exemplo, no “cracking” catalítico do petróleo. Atualmente as pesquisas publicadas na área de leito fluidizado (“*Fluidized bed*”) têm variado pouco, com média em torno de 2 mil publicações anuais. O número de pesquisas relacionadas ao termo co-combustão de biomassa (“*Biomass co-firing*”) mostra um aumento de mais de 400% em artigos publicados entre os anos de 2001 até 2015, porém com números menos expressivos comparados aos da biomassa.

**Figura 1** - Número de artigos científicos publicados na base de dados do Science Direct utilizando os termos “*Biomass*”, “*Fluidized bed*”, “*Biomass co-firing*” e “*Black Wattle*”.



Fonte: <http://www.sciencedirect.com/>.

O número de publicações relacionadas ao termo Acácia Negra (“*Black Wattle*”), apresentou número máximo de 81 publicações no ano de 2013. A baixa quantidade de artigos publicados sobre a Acácia Negra pode estar relacionada aos

poucos lugares onde esta leguminosa é cultivada e a localização pontual das indústrias. No sul do Brasil e África do Sul, são os lugares onde se tem praticamente toda a produção mundial de tanino oriundo da acácia negra e, conseqüentemente, os lugares onde são gerados os resíduos desta atividade. Cabe ressaltar que os resíduos oriundos da produção de tanino a partir da acácia negra são classificados como biomassa a qual pode ser promissora na produção de energia renovável e que ainda não apresenta estudos específicos para tal fim.

Pesquisas recentes mostram a utilização e o aproveitamento energético das biomassas residuais em reatores de leito fluidizado para a geração de energia. Contudo não se observam estudos sobre a utilização dos Resíduos da Casca de Acácia Negra (RCAN) para essa finalidade. Smit & Meincken (2012) utilizaram uma unidade de combustão em escala de laboratório para analisar o desempenho de vários combustíveis de madeira incluindo a madeira de Acácia Negra. Feng et al., (2013) apresentaram uma revisão dos trabalhos envolvendo a transformação de cascas residuais em produtos químicos, incluindo a extração do tanino das cascas de Acácia Negra.

Diante do exposto, verifica-se a importância da realização de estudos que viabilizem o uso de resíduos como os provenientes da acácia negra - RCAN em alternativas para a geração de energia. Por se tratar de uma fonte renovável e com grande disponibilidade, a avaliação de seu uso como potencial energético em processos de co-combustão com carvão mineral motivou a realização do presente estudo.



## 2 OBJETIVOS

Considerando que o processo de co-combustão de Resíduos de Cascas de Acácia Negra (RCAN) com carvão mineral em leito fluidizado borbulhante necessita de estudos para determinação de parâmetros do processo e, considerando ainda a elevada geração de resíduos desta biomassa, bem como o seu potencial energético e a grande reserva de carvão mineral existente no Rio Grande do Sul, este trabalho teve como objetivo principal o estudo de parâmetros operacionais do processo de co-combustão de carvão mineral e RCAN, em planta piloto com leito fluidizado borbulhante.

Os objetivos específicos da pesquisa foram:

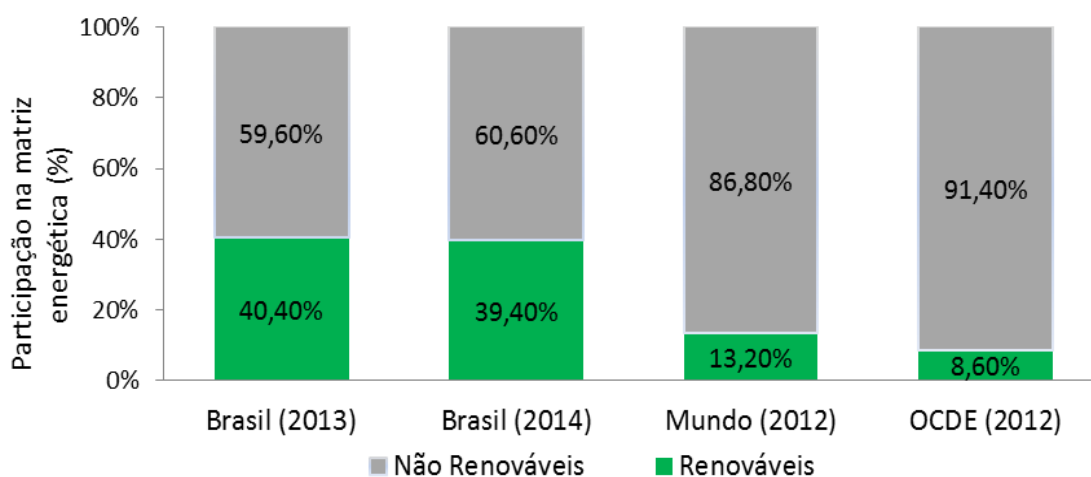
- caracterizar os materiais utilizados (RCAN e carvão mineral) e a composição das cinzas geradas;
- avaliar parâmetros fluidodinâmicos em leito fluidizado em escala de bancada;
- realizar operações com diferentes razões de alimentação (Carvão/RCAN) em leito fluidizado de bancada e planta piloto;
- estudar a adição do RCAN na combustão com carvão mineral e a sua influência na formação dos compostos  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  e  $\text{CO}$ ;
- avaliar a energia gerada nas operações de combustão do carvão em planta piloto de leito fluidizado borbulhante e co-combustão do carvão mineral com a biomassa RCAN.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Matriz Energética do Brasil

A matriz energética de um determinado local leva em conta fatores que são determinantes para a escolha das fontes de energia que serão utilizadas em diversos países. A disponibilidade de recursos, interesses comerciais, domínio de tecnologias e preservação do meio ambiente são as premissas necessárias e relevantes para o desenvolvimento de novas fontes de produção energética. O Brasil, por apresentar condições favoráveis de recursos naturais e uma vasta bacia hidrográfica, possui uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo entre os países industrializados, embora utilizando derivados do petróleo e carvão mineral como fonte de energia primária. Em 2014, segundo o Ministério de Minas e Energia, 39,4% do total da energia brasileira teve como origem fontes renováveis de geração (hidráulica, biomassa, eólica e solar), enquanto países membros da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico), da qual fazem parte países da Europa, Estados Unidos, Canadá e Austrália, alcançaram índices de apenas 8,6% da participação desses recursos, como mostra a Figura 2.

**Figura 2** - Participação de fontes renováveis e não renováveis na matriz energética brasileira, mundial e países da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico).

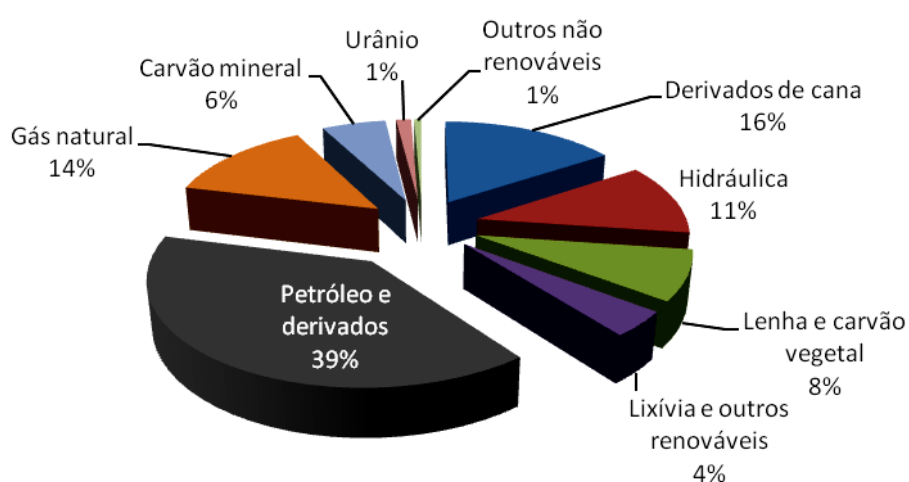


Fonte: BRASIL, 2014.

Segundo o relatório do Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2015), a geração de energia no País apresenta como principais fontes renováveis os derivados de cana de açúcar e a geração hidráulica com 16% e 11% desse total,

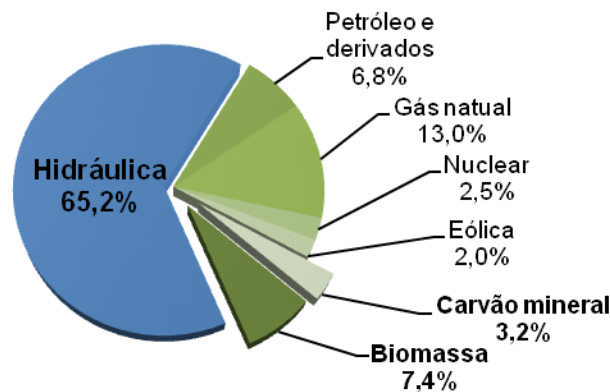
respectivamente. A Figura 3 apresenta os dados desta oferta interna de energia por cada fonte no Brasil. A lenha e o carvão vegetal atingem apenas 8% da oferta. Apesar do elevado investimento do governo e instituições privadas em fontes alternativas de geração de energia como a eólica, as participações desse tipo de fonte consistem em pouco mais de 4% da oferta. Por fim, os dados do balanço energético nacional de 2015 mostram a elevada parcela dos combustíveis derivados do petróleo com 39% da oferta de energia primária oferecida em 2014 (BRASIL, 2015).

**Figura 3 - Oferta interna de energia no Brasil em 2014.**



Fonte: BRASIL (2015).

Com relação à geração de energia elétrica ressalta-se a disponibilidade de recursos hídricos como a ocorrência de cursos d'água por quase todo o território brasileiro, o que propicia uma oferta de geração de energia por esta fonte que chega a mais da metade da matriz elétrica do país. Dessa forma, a participação das hidroelétricas chegou a 65,2% da geração elétrica no Brasil em 2014, embora tenha apresentado uma redução de 5,4% em comparação à pesquisa do ano anterior, devido às condições climáticas e hidrológicas desfavoráveis. A Figura 4 apresenta o total da distribuição da oferta interna de energia elétrica referente ao ano de 2014 (BRASIL, 2015).

**Figura 4** - Oferta interna de energia elétrica no Brasil.

Fonte: BRASL (2015).

Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016), o segmento de geração elétrica conta com 4.048 empreendimentos geradores dos quais 2.291 são usinas termelétricas. Como segunda maior fonte de geração de energia elétrica do País, a geração térmica é responsável por 32,9% da potência instalada (kW), apresentando como combustíveis: 13% gás natural; 7,4% biomassa; 6,8% óleo diesel/combustível; 3,2% carvão mineral e 2,5% nuclear.

Apesar da matriz elétrica brasileira possuir como base fontes "limpas" de energia, a dependência por meio da geração hidráulica e a baixa utilização de fontes alternativas, como a eólica e o uso de biomassa, fizeram com que, em 2002, fosse promulgada a Lei nº 10.438 (BRASIL, 2002), do "Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica". Esta lei tem como objetivo estimular a geração de energia eólica, o uso térmico de diferentes tipos de biomassa e a utilização de pequenas centrais hidrelétricas (GOMES, 2013).

É importante mencionar a Lei nº 12.305, de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos que visa à redução na geração de resíduos. Esta lei apresenta como proposta a prática de hábitos de consumo sustentável e um conjunto de instrumentos que tem como finalidade aumentar a reciclagem e a reutilização dos resíduos sólidos, e ainda, incentivar a destinação ambientalmente adequada de todo o tipo de material, impondo que as instituições geradoras elaborem Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) específicos para a correta deposição dos mesmos. Muitos dos resíduos são considerados biomassa e se enquadram na classificação da referida Lei.

Nesse contexto, o uso da biomassa como insumo para a geração de energia elétrica será abordado nos capítulos seguintes na busca de alternativas energéticas e tendo em vista que este material se trata de uma fonte renovável, que pode proporcionar diminuição de custos para destinação dos resíduos para empresas e adequação à legislação. Ainda, serviria como medida no sentido de ajudar a substituir gradualmente os combustíveis causadores de maior impacto ambiental, uma vez que este é um caminho natural condicionado pela quantidade finita dos recursos energéticos não renováveis.

## **3.2 Biomassa**

A utilização de biomassa, a exemplo da madeira, para fins energéticos, acompanha a humanidade desde os seus primórdios. Foi graças ao fogo e à madeira, que foi possível ao homem primitivo afugentar os animais selvagens, cozinhar os seus alimentos, aquecer-se e moldar instrumentos de seu uso diário. O domínio da energia contida na biomassa permitiu então aos seres humanos, enormes evoluções não só em nível da qualidade de vida como em nível social e tecnológico. Os subcapítulos na sequência apresentarão características gerais das biomassas utilizadas como fontes de energia, assim como conceitos básicos das reações de combustão e introduzirão a utilização da biomassa em processos de co-combustão com carvão mineral em leito fluidizado.

### **3.2.1 Características da biomassa**

No contexto de produção de energia, entende-se por biomassa a fração biodegradável de produtos e resíduos provenientes da agricultura e da silvicultura, bem como os resíduos industriais e urbanos que armazenaram energia a partir do sol em forma de energia química e que possam ser utilizados como combustíveis ou para a sua produção (ARAÚJO, 2008). O conceito de biomassa se popularizou no final do século XX e começo do século XXI, tendo em vista a possibilidade de seu uso em grande escala e a preocupação em aprimorar técnicas de produção e exploração de fontes de energia renováveis.

Quanto à composição química, a biomassa é constituída de misturas de hemicelulose, celulose e lignina, em proporções variáveis de seus constituintes

condicionados à variedade de cada tipo de biomassa. Esses compostos orgânicos compõem a parede celular dos vegetais e conferem a esse tipo de material elevada quantidade de matéria volátil e oxigênio. Na composição da biomassa, também fazem parte constituintes inorgânicos, geralmente referidos como cinzas, os quais normalmente se encontram no intervalo de 1% a 15% em massa, sendo que nos resíduos agrícolas esse valor pode chegar próximo de 25%. Nas cinzas, ainda encontram-se potássio, cálcio, sódio, sílica, fósforo, cloro, magnésio entre outros (IDEIAS, 2008).

Apesar da alta variabilidade associada às propriedades da biomassa, esta difere, consideravelmente, de combustíveis como o carvão em parâmetros como a sua composição química (orgânica e inorgânica), no conteúdo energético e nas características físicas. Comparando a biomassa ao carvão mineral, em sua maioria, a biomassa caracteriza-se por apresentar maiores teores em umidade, oxigênio e nitrogênio, menor poder calorífico e menor teor de carbono em sua constituição. Ainda, características como menor densidade e fusibilidade também são observadas nas biomassas, da mesma forma que menores quantidades de enxofre, ferro e alumínio (DEMIRBAS, 2004). A Tabela 1 apresenta valores médios relativos a diversas propriedades físicas e químicas encontradas em combustíveis de biomassa e carvão mineral.

**Tabela 1**- Propriedades físicas e químicas típicas de biomassa e carvão mineral.

| Propriedades   | Biomassa  | Carvão    |
|--|-----------|-----------|
| Massa específica do combustível (kg/m <sup>3</sup> ) | ~500      | ~1300     |
| C <sup>a</sup> (%m/m)                                | 42 - 54   | 65 - 85   |
| O <sup>a</sup> (%m/m)                                | 35 - 45   | 2 - 15    |
| S <sup>b</sup> (%m/m)                                | Max 0,5   | 0,5 - 7,5 |
| SiO <sub>2</sub> <sup>b</sup> (%m/m)                 | 23 - 49   | 40 - 60   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>b</sup> (%m/m)   | 2,4 - 9,5 | 15 - 25   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>b</sup> (%m/m)   | 1,5 - 8,5 | 8 - 18    |
| Temperatura de Ignição (°C)                          | 418 - 426 | 490 - 595 |
| Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)                    | 14 - 21   | 23 - 28   |

a % mássica em base seca de combustível

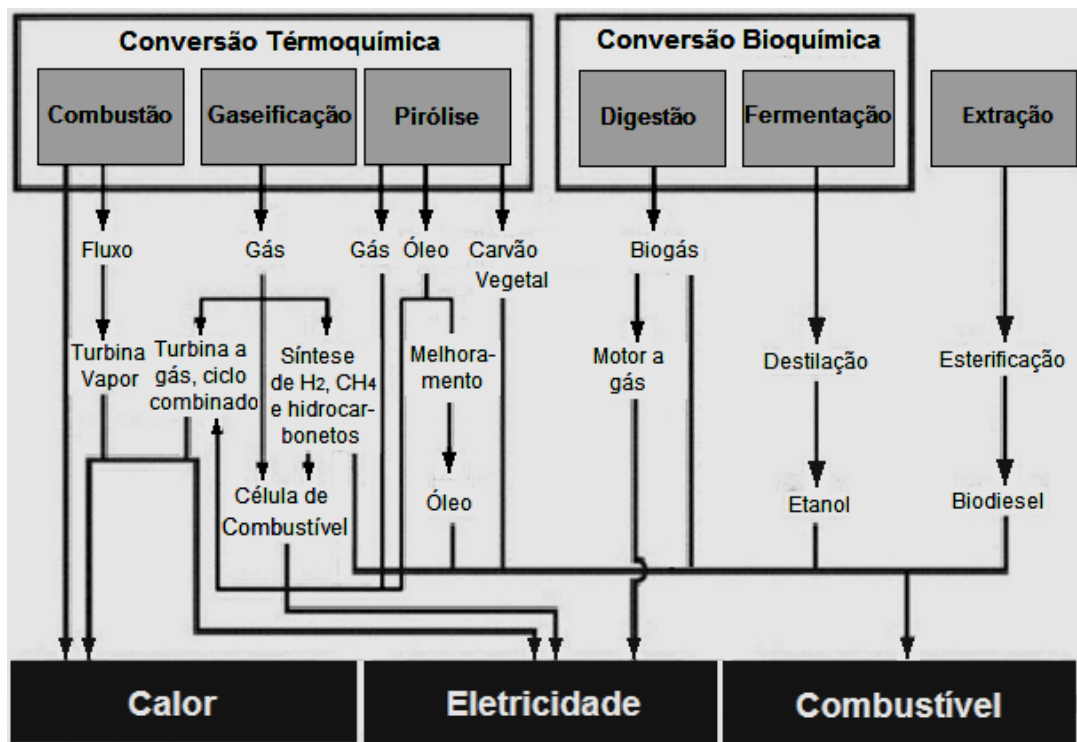
b % mássica em base seca das cinzas

Fonte: adaptado de DEMIRBAS, 2004.

### 3.2.2 Conversão energética

A conversão de biomassa em formas úteis de energia pode ser realizada de várias formas e levando em conta diversos fatores. Os fatores mais relevantes são a quantidade de biomassa disponível, a viabilidade técnica e econômica das instalações e especificações técnicas e reguladoras que podem influenciar ou condicionar a tecnologia a ser escolhida. A conversão termoquímica é um dos processos mais utilizados para a conversão da biomassa, mas existem outras tecnologias como a conversão biológica ou bioquímica (MCKENDRY, 2002). A Tabela 5 apresenta um resumo das tecnologias de conversão que utilizam biomassa.

**Figura 5 -** Tecnologias de conversão de biomassa.



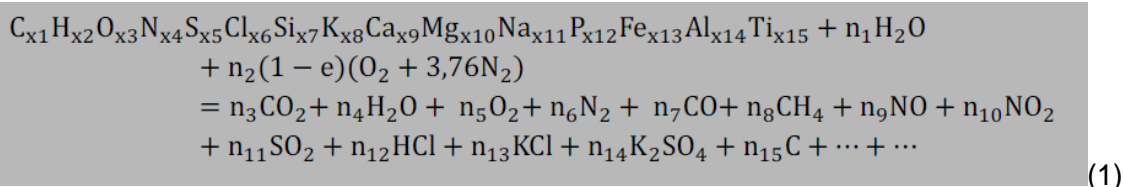
Fonte: Adaptado de Saidur et al. (2011).

Os processos termoquímicos de pirólise, gaseificação e combustão são fenômenos complexos que envolvem reações químicas com transferência de calor e massa intimamente relacionada com a fluidodinâmica do meio reacional. O processo de pirólise é entendido como sendo a degradação térmica de biomassa, ou uma combustão completa em atmosfera controlada sem a presença de oxigênio ou com uma quantidade muito limitada de agentes oxidantes. Geralmente, os produtos

dessa reação são compostos gasosos, líquidos pirolíticos e sólidos carbonizados, ou então, apenas voláteis e sólidos carbonizados (DEMIRBAS, 2009).

A conversão de biomassa em processos de gaseificação ocorre com a oxidação (combustão) parcial da biomassa em uma mistura de gás combustível, em um intervalo de temperatura elevada (800 a 900°C) e com quantidades limitadas de oxigênio. Como produtos de reação têm-se, em sua maior parte, os gases de combustão e, em quantidades menores, as cinzas e o material carbonizado (DEMIRBAS, 2004, 2009).

O processo de combustão de biomassa é considerado um processo de oxidação completa dos compostos combustíveis, onde os produtos gerados são gases (CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O), cinzas e energia. Esse processo consiste na reação dos componentes da biomassa com o oxigênio do ar, mantendo certa quantidade de excesso de oxigênio para garantir a conversão completa dos constituintes da biomassa (MARTINS, 2012; MCKENDRY, 2002). A reação global de combustão da biomassa com o ar apresentada por Bryan Jenkins (1998) tem a forma expressa pela Equação 1.



Na fórmula química da biomassa (primeiro termo da Equação 1), percebe-se que foram incluídos quinze elementos, contudo existem outros, com igualdade de importância na combustão da biomassa. Entre esses elementos químicos encontram-se os metais pesados que, de um modo geral, não estão em abundância na biomassa, mas que, por algum motivo particular, poderão estar presentes em concentrações expressivas e que, devido à sua toxicidade, irão necessitar de uma atenção especial quanto ao seu tratamento e disposição. O segundo termo da equação química diz respeito à umidade, que pode variar muito na biomassa disponível. O último termo da expressão, do lado dos reagentes, refere-se ao ar de combustão representado pelos seus constituintes principais, nitrogênio e oxigênio. A parte correspondente aos produtos da reação de combustão é mais complexa e constituída de uma grande variedade de espécies que ocorrem em maior ou menor



quantidades, além de algumas substâncias indesejadas que poderão causar problemas de corrosão e incrustações nas instalações, como HCl e KCl; e ainda, problemas ambientais, com as emissões dos gases CO, CH<sub>4</sub>, NO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> (JENKINS et al., 1998; MILES et al., 1995).

### 3.2.3 Biomassa no Brasil

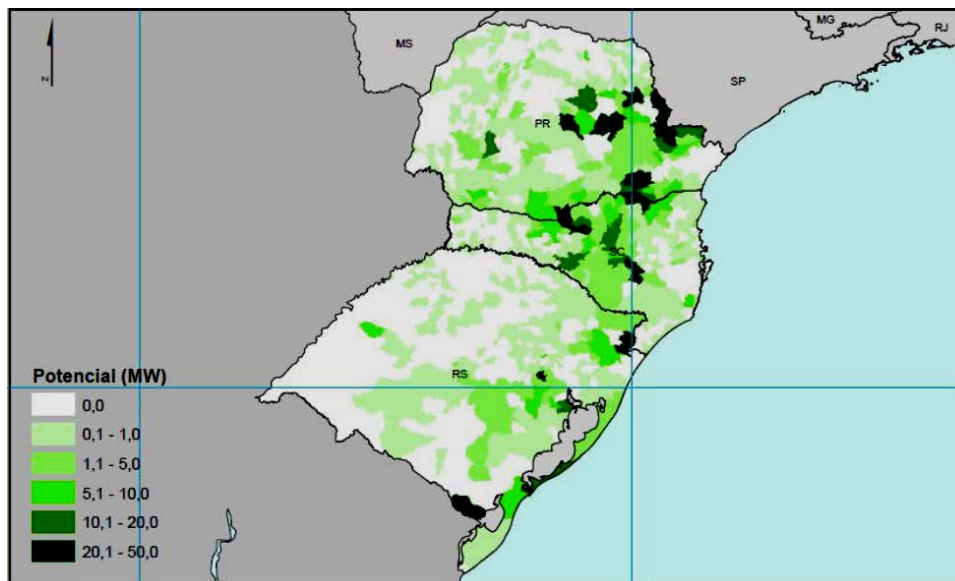
No Brasil, são geradas elevadas quantidades anuais de resíduos orgânicos considerados como biomassas. Uma vez que o País é um importante produtor agrícola, a tendência é de uma elevação da disponibilidade desses resíduos devido ao crescimento da produção primária. O Brasil tem cerca de 60,7% de sua área coberta por florestas, com aproximadamente 45.000 km<sup>2</sup> de áreas de reflorestamento de eucalipto e ainda é um dos maiores produtores mundiais de madeira e celulose provenientes da silvicultura (BRASIL, 2010). O sul do Brasil, por exemplo, é responsável por cerca de 38% da produção agrícola nacional, de onde se destacam os resíduos do cultivo de arroz, de trigo e de soja, os quais possuem potencial de aproveitamento para a geração de energia (IBGE, 2014). Além disso, os resíduos da cadeia florestal brasileira, no ano de 2010, chegaram próximos aos 90 milhões de metros cúbicos e os resíduos da produção de papel e celulose foram estimados em 11 milhões de toneladas (BORTOLIN et al., 2012).

A região Sul do Brasil tem sua economia baseada na agricultura, pecuária e possui uma silvicultura bem estabelecida. A silvicultura é uma ciência que se ocupa das atividades ligadas à implantação e ao manejo de florestas, e que tem como objetivo o aproveitamento e a manutenção racional das matas, em função do interesse ecológico, científico, econômico e social. No estado do Rio Grande do Sul, o setor florestal possui, aproximadamente, 650 mil hectares de florestas plantadas com espécies exóticas de rápido crescimento, dos quais predominam o eucalipto, o pínus e a Acácia Negra (EMATER/RS, 2016). O estado é o maior produtor de Acácia Negra (*Acacia mearsii De Wild*) do País e é visando o aproveitamento desta fonte orgânica, a qual posteriormente se transformará em Resíduo de Casca de Acácia Negra (RCAN), que se desenvolveu o presente trabalho.

Tendo em vista as questões levantadas a respeito da silvicultura, em especial no estado do Rio Grande do Sul, a Figura 6 mostra o potencial de geração de

energia a partir do uso de resíduos deste setor na Região Sul do Brasil. Observa-se que, no Rio Grande do Sul, o potencial está concentrado na região litorânea, na região da serra e, em parte, na região central e na chamada microrregião de Montenegro, Estrela e Lajeado. Nesta última, concentra-se a maior produção de Acácias Negras do estado gaúcho (GOMES, 2013).

**Figura 6** - Estimativa do potencial de geração de energia a partir de resíduos da silvicultura na Região Sul do Brasil.



Fonte: Gomes (2013).

### 3.2.3.1 Resíduos de Casca de Acácia Negra (RCAN)

A quantidade de resíduos orgânicos gerados e considerados como biomassas potenciais do Rio Grande do Sul é grande. Como já mencionado, o estado é o maior produtor de Acácia Negra (*Acacia mearnsii* De Wild) do País. Esta leguminosa é uma espécie não nativa do Brasil, mas que se adaptou muito bem ao clima subtropical da região. Acácia Negra é uma árvore que possui uma rotação média de sete anos e, devido ao seu rápido crescimento e alto poder calorífico de sua madeira tem sido, por muitos anos, uma fonte ideal de combustível para as pessoas que vivem no campo.

O cultivo desta leguminosa está muito relacionado à extração da madeira e do tanino presente na casca desta árvore (FENG et al., 2013; PERES et al., 2015). No processo de extração do tanino, grandes quantidades de casca são processadas para a obtenção do extrato e, conseqüentemente, resulta na produção de grandes

volumes de Resíduos de Casca de Acácia Negra (RCAN), os quais são destinados à compostagem orgânica, combustão ou disposição em aterros, gerando custos adicionais às empresas produtoras. No ano de 2013, foram produzidas cerca de 105 mil toneladas de casca de acácia negra pelo setor florestal e silvicultura no estado do Rio Grande do Sul, totalizando 100% da produção nacional (IBGE, 2016). O setor industrial de processamento e extração de tanino apresentou em 2014 uma média de produção anual de aproximadamente 164.250 mil toneladas do resíduo.

### 3.2.4 Disponibilidade energética dos RCAN

Dentro da geração de resíduos de biomassa, os resíduos da casca de acácia negra foram avaliados com relação à sua disponibilidade energética para serem aproveitados em sistemas de combustão. Para tal, os dados da produção de resíduos do setor florestal (silvicultura) proveniente de fontes oficiais do IBGE (2016) foram utilizados, em toneladas/ano, assim como, também dados não oficiais do setor industrial de extração do tanino, a fim de fornecer uma estimativa da geração de RCAN ( $G_{RCAN}$ ) derivados de cada setor.

Para o cálculo do Potencial Energético Disponível dos Resíduos de Casca de Acácia Negra ( $PD_{RCAN}$ ) considerou-se o Poder Calorífico Inferior em base como recebida ( $PCI_{bcr}$ ) dos resíduos de cada tipo de segmento. Por passarem por diferentes processos de obtenção e geração, o  $PCI_{bcr}$  dos resíduos de cada tipo de segmento é distinto. O valor do  $PCI_{bcr}$  do RCAN derivado do setor industrial utilizado no cálculo do  $PD_{RCAN}$  foi obtido experimentalmente pelo presente trabalho (Tabela 6). Para fins de comparação, foi adotado o  $PCI_{bcr}$  para os resíduos derivados da acácia negra do setor florestal obtido por GOMES (2013). A Equação 2 representa a expressão para o cálculo da potência disponível para os resíduos derivados da Acácia Negra em megawatt térmico ( $MW_t$ ) e megawatt elétrico ( $MW_e$ ).

$$PD_{RCAN} = G_{RCAN} * PCI_{bcr} * 1,33 \times 10^{-7} \quad (2)$$

O coeficiente  $1,33 \times 10^{-7}$  é utilizado para a transformação das unidades apresentadas para  $MW_t$ . O  $PD_{RCAN}$  em megawatt elétrico ( $MW_e$ ) foi obtido considerando o rendimento na conversão da energia térmica na ordem de 25%. A

Tabela 2 apresenta os valores das quantidades dos resíduos de acácia negra e das potências térmicas disponíveis obtidas.

**Tabela 2** - Geração de Resíduos de Casca de Acácia Negra ( $G_{RCAN}$ ) e Potencial Energético Disponível dos Resíduos de Acácia Negra ( $PD_{RCAN}$ ).

| Fontes de RCAN   | $G_{RCAN}$ (t/ano) | $PD_{RCAN}$ ( $MW_t$ ) | $PD_{RCAN}$ ( $MW_e$ ) |
|------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| Silvicultura     | 105.578            | 55                     | 14                     |
| Setor industrial | 164.250            | 81                     | 20                     |

Os resíduos da área da silvicultura e de extração da madeira geram mais de 105,5 mil toneladas anuais de resíduos derivados de acácia negra (IBGE, 2013), como raspas, serragens da madeira além de cascas sem processamento. O cálculo da Potência Disponível de Energia dos resíduos destes setores, tendo como base a geração de resíduos do ano de 2013 (105.578 toneladas) chegou a 55  $MW_t$ . Já o setor industrial de processamento e extração de tanino gera cerca de 900 toneladas diárias de RCAN, o que resulta numa produção anual de aproximadamente 164.250 mil toneladas do resíduo. Dessa forma, a potência disponível chega a mais de 81 MW térmicos para o RCAN derivado do setor industrial.

Levando-se em conta as disponibilidades de resíduos mencionadas do setor industrial e dos resíduos da silvicultura, a Tabela 3 apresenta um resumo da capacidade média de geração termelétrica instalada no Brasil de unidades que utilizam como fontes geradoras o carvão mineral e os resíduos florestais (BRASIL, 2016; CGTEE, 2016).

**Tabela 3** – Capacidade média instalada de unidades que utilizam carvão mineral e resíduos florestais.

| Fonte das Usinas          | Capacidade média instalada (MW) |
|---------------------------|---------------------------------|
| Carvão Mineral (Candiota) | 796                             |
| Resíduos Florestais       | 50                              |

Fonte: BRASIL, 2016 e CGTEE, 2016.

Atualmente, se observa que a potência de geração média instalada para usinas termelétricas que utilizam resíduos florestais é de cerca de 50 MW (BRASIL, 2016). Mesmo com grande parte destas usinas localizadas na região sul do País, esta potência instalada não é tão elevado comparada a potencia instalada de termelétricas que utilizam o carvão mineral, como apresentada na Tabela 2, o que dificulta uma tentativa de inclusão ou aproveitamento do RCAN nestas usinas. Com uma capacidade média instalada do complexo termelétrico de Candiota para carvão

mineral de 796 MW (CGTEE, 2016), bem mais elevada quando comparada com a capacidade instalada dos resíduos florestais, pode-se ponderar um aproveitamento do potencial energético disponível de resíduos como da casca de acácia negra neste setor, e ainda, considerar estudos para adaptação a um sistema de co-combustão destes combustíveis.

Em suma, a possibilidade da utilização de RCAN como combustível para a geração de energia apresenta elevado potencial. A biomassa RCAN poderia ter um aumento de utilização a partir do seu uso na co-combustão com carvão, em especial nas pequenas centrais termelétricas descentralizadas da região sul do Brasil e próximas aos locais de origem da biomassa e do carvão mineral, uma vez que as maiores jazidas estão localizadas nesta região.

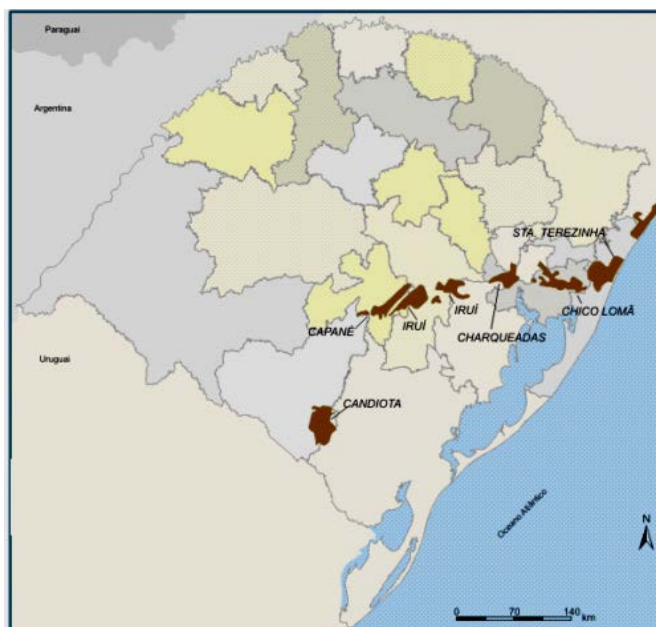
### **3.3 Carvão Mineral**

O carvão mineral continua a exercer um papel importante como fonte de energia primária, dada a disponibilidade em enormes reservas que estão espalhadas pelo mundo. O carvão é uma rocha sedimentar combustível proveniente de depósitos de restos de plantas e árvores que se acumularam em pântanos sob uma lâmina d'água por milhões de anos. Esse processo de conversão da matéria orgânica em carvão se dá em função da ação de microrganismos, da pressão, da temperatura e do tempo. Estes processos proporcionaram a expulsão do oxigênio e do hidrogênio concentrando o carbono da matéria orgânica (processo de carbonificação). Os estágios de formação do carvão podem ser divididos em: turfa, linhito (baixo grau de carbonificação), carvão hulha e antracito (alto grau de carbonificação). Os carvões também são classificados segundo a norma ASTM-D388 nas classes: linhítico, sub-betuminoso, betuminoso e antracítico.

No Brasil, carvões do tipo linhítico e carvões sub-betuminosos podem ser encontrados na Região Sul, nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Aproximadamente 88% desses recursos estão localizados no Rio Grande do Sul. Os locais mais importantes, listados geograficamente de sudoeste para nordeste do estado, são: Candiota, Capané, Iruí, Leão, Charqueadas, Morungava-Chico Lomã, Santa Terezinha, bem como os depósitos localizados no estado de Santa Catarina, como mostrado na Figura 7. A principal reserva deste mineral é a

mina de Candiota, localizada na metade sul do estado do Rio Grande do Sul, que é também a maior reserva brasileira conhecida, onde a camada de carvão possui grande continuidade e cobertura pequena (BRASIL, 2008).

**Figura 7** - Localização dos principais depósitos minerais de carvão no estado do Rio Grande do Sul.



Fonte: Gomes (2011).

Os carvões provenientes das jazidas brasileiras possuem um elevado teor de cinzas em sua composição em comparação a carvões de outros países. A matéria inorgânica e os resíduos não combustíveis que constituem o carvão mineral são denominados de cinzas. Em regiões como Minas do Leão, se obtém carvões com uma média de 35% de cinzas em sua constituição. Já na jazida de Candiota encontram-se carvões com teores de cinzas acima dos 50% em sua constituição (PIRES et al., 2001).

Quanto aos principais usos do carvão produzido no Brasil, o setor energético é o que tem absorvido a maior parcela, com 94,3% de participação, seguido de usos como corretivo de solos (2,18%), fundição (1,31%), pisos e revestimentos (1,15%), cerâmica vermelha (0,35%), siderurgia (0,24%), cimento (0,21%) e coquearias (0,03%) (DNPM, 2010). O investimento na extração do carvão é cerca de 5 vezes menor do que o necessário para a extração de gás natural e cerca de 4 vezes menor do que para a extração de petróleo (BRASIL, 2008).

### **3.4 Co-combustão**

A co-combustão é a queima simultânea, em um mesmo sistema reacional, de variáveis tipos de biomassa e carvão mineral para a produção de energia. A substituição parcial do carvão utilizado em usinas termelétricas por biomassa apresenta uma série de vantagens, das quais se destacam a redução de emissões por unidade de energia produzida, diminuindo os níveis de emissões de poluentes associados à composição do carvão, como os óxidos de enxofre e metais pesados (Faé Gomes et al., 2013).

A utilização da biomassa e do carvão mineral como combustíveis na co-combustão está condicionada às propriedades e características peculiares ao processo as quais devem ser bem compreendidas para a utilização destas matérias-primas em sistemas de geração em leito fluidizado.

#### **3.4.1 Propriedades dos combustíveis**

Algumas propriedades são comuns a todos os combustíveis, enquanto outras são específicas. O poder calorífico, as composições químicas elementares e imediatas são comuns a todos os combustíveis, enquanto que outras como a densidade relativa, o índice de Wobbe e a velocidade da chama são específicas para combustíveis gasosos. Para combustíveis líquidos como os óleos combustíveis, a viscosidade, o ponto de fulgor, a densidade relativa, e o ponto de fluidez devem ser conhecidos, enquanto que para os combustíveis sólidos, como os carvões minerais, a lavabilidade e as características das cinzas como a fusibilidade devem ser conhecidas.

##### **3.4.1.1 Composição química elementar**

A composição química elementar de uma amostra de combustível é a quantidade relativa, expressa em massa ou volume, dos elementos constituintes do combustível, ou seja, são os teores de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), cinzas e umidade expressos em porcentagem. É uma das características técnicas mais importantes do combustível, porém nem sempre determinada experimentalmente, e constitui a base para a análise dos processos de

combustão como volume de ar necessário para combustão e quantidade de gases gerados.

#### **3.4.1.2 Composição química imediata**

A composição química imediata de um combustível é o conteúdo, em percentagem de massa ou volume, de carbono fixo ( $C_{\text{fixo}}$ ), matéria volátil (MV), cinzas e umidade.

#### **3.4.1.3 Poder calorífico**

O poder calorífico de um combustível é a quantidade de energia liberada, por unidade de massa ou volume, durante a combustão completa de um combustível, geralmente expresso em kJ/kg ou kJ/Nm<sup>3</sup>.

Para um melhor entendimento deve-se considerar duas situações limites. Na primeira, a água presente nos produtos da combustão se encontra completamente no estado gasoso, sem ter fornecido seu calor latente. Na segunda, toda a água está condensada, liberando calor à vizinhança. Quando se considera o calor latente de vaporização do vapor de água gerado pela reação de combustão durante a queima de combustível com ar seco, refere-se ao poder calorífico superior (PCS) e quando não se considera este calor latente está se referindo ao poder calorífico inferior (PCI). Por definição, o PCI, a pressão constante, corresponde ao calor entregue à vizinhança quando uma unidade do combustível, em condições de referência, é queimada completamente em regime permanente, de tal maneira que os produtos saem também em condições de referência e a totalidade da água produzida pela combustão do hidrogênio está no estado de vapor. Em instalações industriais, a temperatura dos gases de saída é maior que a temperatura de condensação, portanto o calor latente não é possível de ser recuperado. Devido a esta consideração, o PCI é mais usado para cálculos de rendimento e viabilidade energética (LORA & NASCIMENTO, 2004).

A determinação do poder calorífico dos combustíveis pode ser realizada em laboratório, mediante o uso de calorímetros ou bombas calorimétricas e, também, a partir de modelos que relacionam a composição química elementar e o poder



calorífico do combustível como apresentadas em LAGEMANN, (2016). A norma brasileira para se determinar o poder calorífico de gases combustíveis é a MB 133 e para o carvão mineral, a NBR 8628 e MB 2063.

Outra maneira de determinar o poder calorífico é pela entalpia de formação. Esta forma de cálculo do poder calorífico, mostrada nas Equações (3) e (4), relaciona as entalpias de formação das substâncias simples ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ , etc) a partir de elementos no estado de referência (298 K e 1 atm) e relaciona as substâncias compostas como  $CO_2$ , e  $CH_4$  através da entalpia de formação padrão destes produtos (LAGEMANN, 2016).

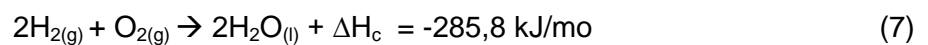
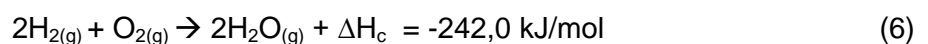
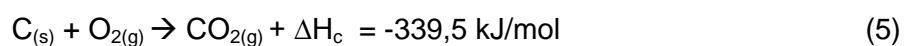
$$H_P^0 - H_R^0 = \text{Poder Calorífico} \quad (3)$$

$$H_P^0 - H_R^0 = n_P \cdot h_{f_P}^0 - n_R \cdot h_{f_R}^0 \quad (4)$$

Onde,  $h^0$  é a entalpia de formação padrão dos compostos e o subscrito R, se refere aos compostos reagentes e P, aos produtos da reação.

### 3.4.2 Definições e reações de combustão

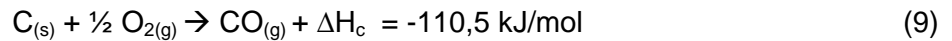
Pode-se considerar que a maioria dos combustíveis empregados industrialmente é composta basicamente de carbono, hidrogênio e enxofre, podendo conter também oxigênio e nitrogênio. Em um processo de combustão, as principais reações que ocorrem com essas substâncias são expressas nas Equações 5 a 8:



Essas reações ocorrem quando a quantidade de oxigênio for suficiente para a total oxidação de cada elemento combustível, e sendo assim é considerada como uma combustão completa. A combustão é dita completa quando todos os elementos químicos presentes no combustível reagem totalmente com o oxigênio ocorrendo à máxima liberação de calor.

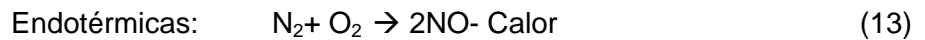
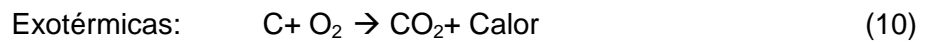
A insuficiência de oxigênio ocasiona uma combustão incompleta com emissão de monóxido de carbono e conseqüentemente uma menor quantidade de

energia liberada, reduzindo a eficiência do processo de combustão, como mostra a Equação 9.



Para manter a velocidade de queima é necessário manter a concentração dos reagentes, o que é feita pela alimentação contínua do combustível e do ar de combustão. Independente do tipo de combustível ocorrerá a presença de fuligem no fluxo de gases para a chaminé. A quantidade de fuligem dependerá das condições operacionais do sistema.

Em reatores ou câmaras de combustão podem ocorrer reações exotérmicas, onde há liberação de calor e, endotérmicas onde se tem absorção de calor e podem ser exemplificadas como segue (Equações 10 a 13).



A reação do nitrogênio com oxigênio (Equação 13) ocorre no núcleo da chama que é uma região de alta temperatura e há a absorção de calor (LAGEMANN, 2016).

### 3.4.3 Ar de combustão e excesso de ar

O ar atmosférico, pela sua disponibilidade, é a fonte mais usada para obtenção do oxigênio necessário para a combustão. A composição mássica do ar atmosférico é composta por 76,8% de  $N_2$  e 23,2% de  $O_2$ , sendo que a relação entre estes componentes é de 3,76 mols de  $N_2$  para 1 mol de  $O_2$ . Outros elementos do ar, contudo em pequenas quantidades, são gases nobres (argônio, criptônio, xenônio e hélio), ozônio, dióxido de carbono e vapor d'água.

Em processos industriais de combustão, a completa oxidação do carbono é obtida usando um excesso de ar em relação à estequiometria da reação. Os combustíveis gasosos queimam com menor excesso de ar, enquanto que para os

combustíveis líquidos ou sólidos, onde as diferentes etapas de combustão acontecem na superfície de gotas ou partículas, a quantidade de ar em excesso requerida é maior. Contudo, o excesso de ar tem limite e quanto maior for o excesso de ar, maior será a perda de calor sensível pela chaminé (LORA & NASCIMENTO, 2004).

Todo processo de combustão deve atender a princípios que assegurem economia ou eficiência na queima de combustível. Entretanto, na prática, em condições normais de operação, é muito difícil o aproveitamento integral da energia disponível no combustível, razão pela qual se faz necessário um trabalho de otimização com vistas à minimização das perdas de energia envolvidas no processo de combustão. Para que a combustão ocorra eficientemente, com menores condições de combustão incompleta, são necessárias algumas características:

- a) temperatura elevada o suficiente para iniciar e manter a queima do combustível;
- b) mistura adequada do ar com o combustível, e;
- c) tempo suficiente para a ocorrência da reação de combustão.

A combustão incompleta pode ser causada, além das condições citadas, por insuficiência de ar no processo o que implica em desperdício de combustível e que pode ser identificada por indicadores como: presença de CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> nos gases de combustão e a presença de partículas com fração considerável de carbono não queimado (fuligens) (LAGEMANN, 2016).

A quantidade mínima de ar que fornece oxigênio suficiente para a combustão completa de todo o carbono, o hidrogênio e o enxofre presente no combustível é denominada quantidade teórica ou estequiométrica de ar. Para a combustão completa com a quantidade teórica de ar, os produtos consistiriam em dióxido de carbono, água, dióxido de enxofre, o nitrogênio do ar e qualquer nitrogênio contido no combustível. Nenhum oxigênio livre apareceria nos produtos.

Normalmente, a quantidade de ar fornecida em processos de combustão não obedece às condições estequiométricas. A quantidade de ar que é de fato fornecida no processo é comumente expressa em termos da percentagem de ar em excesso. Por exemplo, 150% de ar em excesso significa que o ar que foi de fato fornecido é

2,5 vezes a quantidade estequiométrica de ar. De outra forma, a quantidade de ar pode ser expressa como coeficiente de excesso de ar que representa a relação entre o  $n^{\circ}$  de mols realmente utilizado na combustão e o  $n^{\circ}$  de mols estequiometricamente necessário. Assim, um combustível que fosse queimado com 50% excesso de ar são equivalentes à proporção de trabalho de ar/combustível de 1,50 vezes a proporção estequiométrica. A Tabela 4 apresenta valores usualmente utilizados dos coeficientes de excesso de ar para variados tipos de caldeiras.

**Tabela 4** - Valores usuais do coeficiente de excesso de ar.

| <b>Combustível</b> | <b>Tipo de Fornalha ou caldeira</b> | <b>Coeficiente de excesso de ar</b> |
|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Carvão pulverizado | Aquatubular completa                | 1,15 - 1,20                         |
|                    | Aquatubular parcial fundo seco      | 1,15 - 1,40                         |
| Carvão             | Grelha Fixa                         | 1,30 - 1,60                         |
|                    | Grelha Vibratória                   | 1,30 - 1,60                         |
|                    | Grelha Rotativa                     | 1,15 - 1,50                         |
| Óleo Combustível   | Queimadores de óleo tipo registro   | 1,05 - 1,15                         |
|                    | Queimadores Multicombustível        | 1,05 - 1,20                         |
| Resíduo Ácido      | Queimadores chama plana a vapor     | 1,10 - 1,15                         |
| Gás Natural        | Queimadores tipo registro           | 1,05 - 1,10                         |
| Gás Coqueria       | Queimadores multicombustível        | 1,07 - 1,12                         |
| Gás Alto Forno     | Queimadores de bocal intertubos     | 1,15 - 1,18                         |
| Madeira            | Grelha                              | 1,20 - 1,25                         |
| Bagaço             | Todas as fornalhas                  | 1,25 - 1,35                         |
| Licor Negro        | Fornalhas Recuperação Kraft e Soda  | 1,05 - 1,07                         |

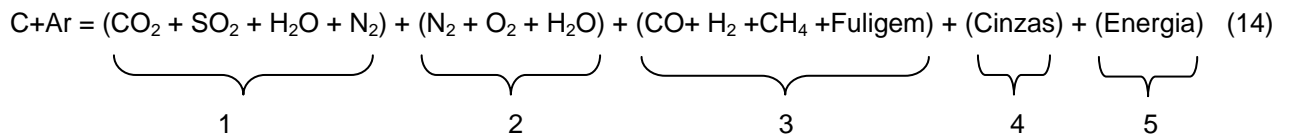
Fonte: adaptado de Pinheiro e Valle (1995)

Para Pinheiro & Valle (1995), o excesso de ar é fator determinante da eficiência da combustão, pois controla o volume, a temperatura e a entalpia dos produtos da combustão. Um elevado excesso de ar em caldeiras é indesejável, pois diminui a temperatura da chama retardando a reação de combustão, aumenta as perdas de calor devido à entalpia dos gases efluentes, reduzindo a eficiência global do sistema de combustão. Por outro lado, ar em quantidade inferior ao ar teórico necessário deve ser evitado, pois propicia a combustão incompleta - uma parte do carbono se une ao oxigênio para formar o monóxido de carbono (CO) e não o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e o aparecimento de fuligem nos gases de combustão.

O valor ótimo do excesso de ar é aquele onde as duas influências acima estão em equilíbrio, suficientemente baixo para minimizar a perda de calor pelos gases efluentes, sem produzir combustão incompleta. Assim, o valor ótimo depende

da eficiência de combustão aceitável e dos limites de poluição impostos para  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  e  $\text{CO}$ , sendo obtido experimentalmente pela análise dos produtos da combustão durante o ajuste do equipamento de combustão.

Em resumo, a combustão de um combustível genérico “C”, sólido ou líquido, com ar, pode ser representada pela equação 14 (Lora & Nascimento, 2004):



Onde cada grupo numerado na equação 14, corresponde-se com:

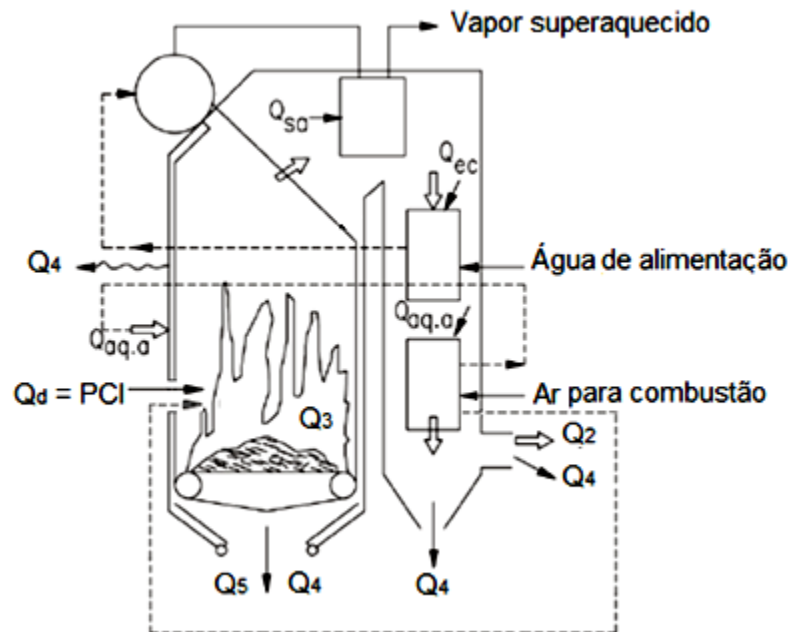
- grupo 1: produtos da oxidação completa;
- grupo 2: ar em excesso e a umidade do combustível e do ar;
- grupo 3: produtos gasosos e sólidos (fuligem) de combustão incompleta;
- grupo 4: fração mineral do combustível (cinzas);
- grupo 5: energia liberada durante a combustão.

#### 3.4.4 Análise energética de sistemas de combustão

A análise energética de um sistema de combustão considera a energia associada aos fluxos de combustível e o ar, juntamente com a reação química da combustão. O balanço de energia também permite analisar a relação que existe entre a energia disponível (baseada no poder calorífico do combustível), a energia absorvida por um fluido de trabalho, e as “perdas de calor” com os gases de exaustão, combustão incompleta, alta temperatura, presença de carbono nas cinzas e fluxo de calor pelas fronteiras do equipamento (RIBEIRO, 2002, LORA & NASCIMENTO, 2004). O calor liberado na combustão de um combustível pode ser aproveitado, por exemplo, no aquecimento de um fluido, como a água, em um gerador de vapor. Como exemplo, baseado na Figura 8, Lora & Nascimento (2004) apresentam o balanço térmico de uma caldeira. A energia que entra no volume de controle configurado pela caldeira denomina-se “calor disponível”, que é equivalente ao poder calorífico do combustível (PCI). Os produtos de combustão a alta temperatura cederão parte de sua energia às diferentes superfícies de aquecimento, sendo,  $Q_e$  - energia absorvida pelas superfícies evaporativas,  $Q_{aq.a}$  - energia absorvida no aquecedor de ar,  $Q_{ec}$  - energia absorvida no economizador e  $Q_{sa}$  -

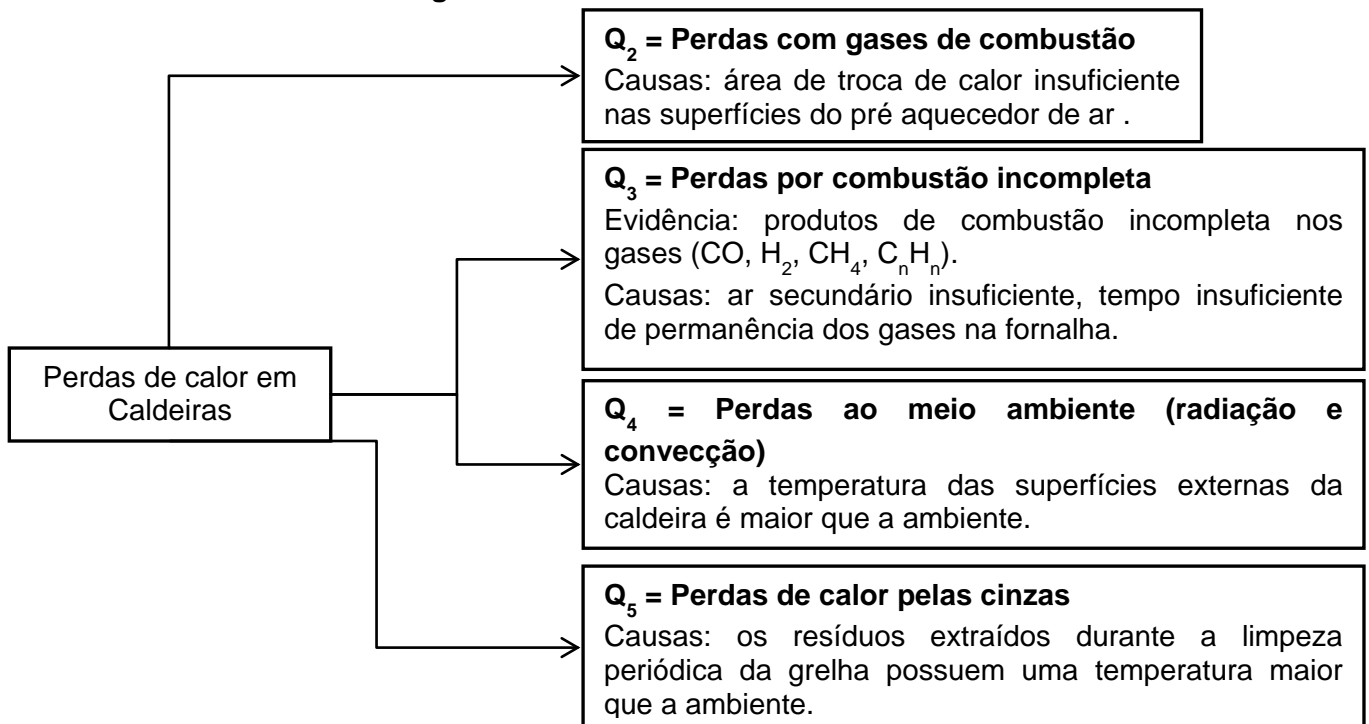
energia absorvida no superaquecedor. A soma  $Q_e + Q_{ec} + Q_{sa}$  constitui a fração do calor disponível aproveitada de uma maneira “útil”, que é chamada de “calor útil”; e as perdas decorrentes do processo são ilustradas na Figura 8 e exemplificadas na Figura 9.

**Figura 8** - Esquema da análise energética do processo de combustão.



Fonte: adaptado de Lora & Nascimento (2004).

**Figura 9** - Perdas de calor em caldeiras.



Fonte: Adaptado de Lora & Nascimento (2004).

### 3.4.5 Vantagens e desvantagens do processo de co-combustão

Na década de 80 nos Estados Unidos e na Europa cresceu o interesse no processo de co-combustão de combustíveis alternativos junto com carvão mineral para obtenção de energia. Essa prática propôs a substituição de parte do carvão mineral utilizado em usinas termoelétricas por biomassa. As características percebidas em materiais orgânicos como o alto teor de matéria volátil, baixas temperaturas de ignição e de combustão se apresentaram como vantagens para conversão termoquímica percebidas na época e motivaram o uso destes materiais (AL-SHEMMERI et al., 2015).

A utilização de biomassa quando em parceria ou em substituição de combustíveis fósseis, se refere à diminuição das emissões dos gases causadores do efeito estufa. Considerando somente a conversão da biomassa, o balanço de carbono é muito favorável, pois as emissões de CO<sub>2</sub> durante a combustão da biomassa se equivalem às que foram absorvidas pela floresta durante o seu desenvolvimento. Em outras palavras, o balanço nulo nas emissões de CO<sub>2</sub> ocorre quando o carbono que se liberta para a atmosfera, durante a sua combustão, corresponder exatamente à quantidade que foi absorvida da atmosfera, durante o processo de fotossíntese, pela vegetação que, de um modo ou de outro, lhes deu origem. No entanto, esta linha de pensamento só será válida se estiver baseada numa política de sustentabilidade que permita repor a vegetação de modo equilibrado, para que esta possa desempenhar eficientemente o papel como fonte fornecedora de carbono (ABELHA et al., 2013). Outra vantagem do uso de combustíveis derivados de biomassa é com relação ao baixo teor em nitrogênio e enxofre em sua constituição, em comparação a combustíveis fósseis. E ainda, o uso de biomassas residuais de processos industriais minimiza os desperdícios e reduzem os níveis de poluição do solo e água ocasionados pela destinação destes em aterros.

Apesar dos benefícios da utilização de biomassa em processos de combustão em leito fluidizado, alguns cuidados devem ser observados como o uso de materiais orgânicos que apresentem um elevado teor em cinzas, baixa densidade e elevada umidade, como folhas de árvores e palha vegetal. Em muitas situações, esses tipos de combustíveis apresentam características que influenciam negativamente nas

temperaturas de funcionamento do equipamento, podendo acarretar problemas de segregação e dificultar a fluidização do leito.

### **3.5 Fluidização**

Segundo Mc Cabe et al. (1993) quando um fluido passa através de um leito de partículas com velocidade suficiente para vencer a queda de pressão oferecida pelo meio, as partículas começam a se movimentar e se tornam suspensas pelo fluido. Este processo é comumente denominado no ramo da engenharia como estado de fluidização. Este conceito de contato entre substâncias possui características incomuns as quais este subcapítulo fará menção, além de apresentar tipos de equipamentos que se utilizam deste princípio.

#### **3.5.1 Comportamento fluidodinâmico dos materiais sólidos**

Considera-se fluidização a condição na qual as partículas estão completamente suspensas por um fluido que escoar no sentido ascendente através do leito de partículas. Nesta condição, partículas em suspensão têm comportamento equivalente ao de um fluido. No que se refere ao regime de fluidização de um leito, as características das partículas e a velocidade de escoamento do fluido podem alterar as características no leito fluidizado, o qual pode assumir comportamentos específicos como os mostrados na Figura 10. Na referida figura estão apresentados os tipos de regimes de escoamento em leito fluidizado mais estudados.

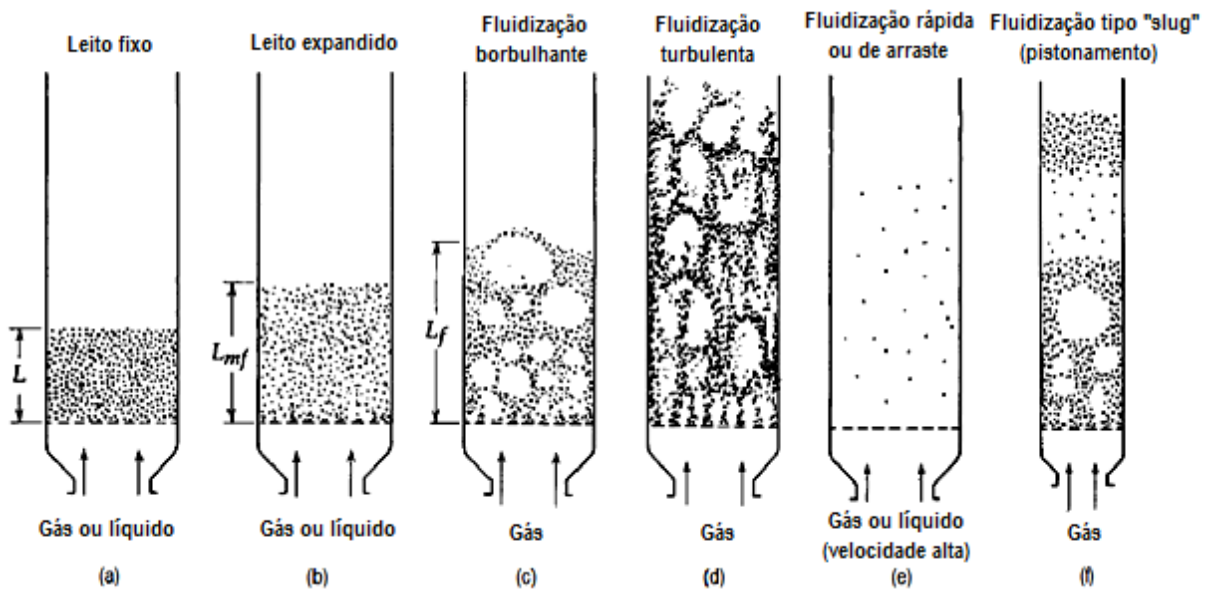
Na Figura 10a, um fluido passa de forma ascendente através de um leito de partículas finas. Com baixa velocidade o fluido apenas percola através dos espaços vazios entre as partículas estacionárias e não há movimento do meio particulado, nesta condição ele é considerado um leito fixo. À medida que aumenta a velocidade do fluido, o leito inicia uma expansão até que a força ascendente do ar se iguale ao peso do leito fazendo com que as partículas distanciem-se entre si, onde pequenas vibrações são observadas, recebendo, neste estado, o nome de leito expandido ou incipiente, Figura 10b (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

Uma característica importante de leitos fluidizados é o momento em que se dá início a fluidização e se tem a velocidade mínima de fluidização do leito. Na Figura



10c encontra-se o leito fluidizado onde o fluxo de ar escoar através do meio com velocidade suficiente para ocasionar a suspensão das partículas podendo ocorrer a formação de bolhas. Quando as bolhas se formam, um movimento vigoroso das partículas aparece devido à coalescência e seguido da quebra destas bolhas (FAN; ZHU, 1998). Dessa forma, a velocidade mínima de fluidização vem a ser um dos principais parâmetros para o estudo do leito fluidizado e será abordada com mais detalhes no item 3.5.2.

**Figura 10** - Tipos de escoamentos em leito fluidizado.



Fonte: adaptado de KUNII & LEVENSPIEL (1991).

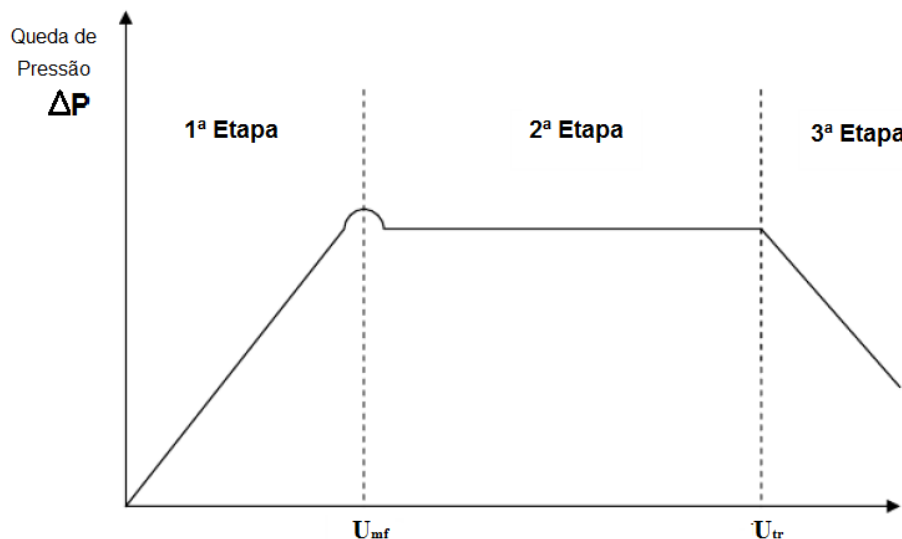
Ao continuar aumentando a velocidade do fluido através do leito, ocorrerá a transição do regime borbulhante para o regime de fluidização turbulenta. Neste estado, o tamanho das bolhas que surgiam no regime anterior se torna pouco visível, onde bolhas grandes começam a se romper e se dividir em bolhas menores e com diferentes formatos, Figura 10d. Já em operações que utilizam elevadas velocidades do fluido e no momento em que se excede a velocidade terminal das partículas do leito se tem o processo de arraste dos materiais, e o regime é considerado de fluidização rápida ou de arraste, Figura 10e (SILVA, 2011).

O regime de fluidização representado na Figura 10f é do tipo "slug" ou também chamado de leito pistonado. Este tipo de regime é observado quando a coalescência das bolhas é do tamanho aproximado ao diâmetro total do corpo do

leito, o que ocasiona o aparecimento de camadas intercaladas de bolhas e de sólidos nas mesmas dimensões do reator (OKA, 2004).

Nesse contexto, o comportamento fluidodinâmico de um leito de partículas em estado de fluidização pode ser analisado relacionando a queda de pressão no leito,  $\Delta P$ , em função das respectivas velocidades do fluido, como demonstrado na Figura 11. Podem ser observadas três regiões distintas na figura, limitadas pelas velocidades de mínima fluidização e velocidade de arraste, onde cada uma delas representa diferentes etapas do processo de fluidização. Na 1ª etapa, o leito se encontra fixo até o ponto em que a pressão total iguala-se ao peso por unidade de área da coluna de sólidos, onde é considerado de forma genérica, o ponto do valor da velocidade mínima fluidização,  $U_{mf}$ . Conforme a velocidade de injeção do fluido aumenta, o sistema entra no estado de leito fluidizado (2ª etapa). Na 3ª etapa, com um aumento ainda maior na velocidade do fluido, as bolhas e os vazios desaparecem e as partículas passam a ser arrastadas pelo fluido caracterizando o transporte rápido ou de arraste, onde o ponto  $U_{tr}$  representa a velocidade terminal ou de arraste do material do leito (FAN & ZHU, 1998; SILVA, 2011).

**Figura 11** - Comportamento fluidodinâmico dos escoamentos em leito fluidizado.



Fonte adaptado KUNII & LEVENSPIEL (1991).

### 3.5.2 Velocidade mínima de fluidização

A velocidade de mínima fluidização das partículas é um parâmetro fluidodinâmico que influencia fortemente o comportamento de leitos fluidizados.

Abaixo desta velocidade, o leito não fluidiza (leito fixo), e muito acima dela, os sólidos são carregados para fora do leito (transporte pneumático ou de arraste). O início de um estado de fluidização ocorre quando há equilíbrio entre a força de arraste promovida pelo fluxo ascendente do gás em movimento e o peso das partículas do leito. Esta afirmação deriva do balanço de forças resultantes no leito fluidizado, que obedece a seguinte relação:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Queda de pressão} \\ \text{através do leito} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} \text{Área da seção} \\ \text{transversal do leito} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Volume} \\ \text{do leito} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} \text{Frações de} \\ \text{sólidos} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} \text{Peso específico} \\ \text{do sólido} \end{array} \right]$$

Em condições de mínima fluidização, a equação (15) que representa a relação acima tem a forma:

$$\Delta P \cdot A = A \cdot H_{mf} \left[ g \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_p - \rho_f) \right] \quad (15)$$

Na Equação 15, o  $\Delta P$  representa a queda de pressão,  $H_{mf}$  e  $\varepsilon_{mf}$  representam a altura e a porosidade do leito para o estado de mínima fluidização, respectivamente. As massas específicas,  $\rho_p$  e  $\rho_f$ , representam a massa específica dos sólidos e do fluido respectivamente e “ $g$ ” a aceleração da gravidade.

No início da fluidização, a porosidade do leito é um pouco maior do que em um leito fixo, correspondendo ao estado expandido do leito de sólidos para qualquer carga e velocidade superficial das partículas. Dessa forma, a velocidade mínima de fluidização,  $U_{mf}$ , é obtida pela combinação da Equação 15 com a extrapolação da expressão de leito fixo estabelecida por Ergun. Atualmente, a equação de Ergun (Equação 16) é o modelo mais utilizado para a previsão da queda de pressão em leitos fixos. É amplamente utilizada e não possui restrições ao número de Reynolds, tanto para leitos de partículas uniformes quanto não uniformes, e até mesmo para misturas de diversos tamanhos de partículas (MOTTA, 2009).

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot U}{(\phi_s \cdot d_p)^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_f \cdot U^2}{\phi_s \cdot d_p} \quad (16)$$

Onde,  $U$  representa a velocidade superficial do fluido,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido,  $\phi_s$  é o fator de esfericidade dos sólidos e  $d_p$  é o diâmetro médio das partículas.

Existem modelos analíticos para o cálculo de velocidade de mínima fluidização propostas pela literatura (GAUTHIER et al., 1999; GREWAL & SAXENA, 1980; LIN et al., 2002; OKA, 2004; SUBRAMANI et al., 2007). Contudo, a maioria das equações é simplificada baseando-se no número de Arquimedes ( $Ar$ ) e número de Reynolds e na condição de mínima fluidização ( $Re_{mf}$ ).

Sendo assim, rearranjando a Equação 16, obtém-se a Equação 17:

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s} \cdot Re_{mf}^2 + 150 \frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s^2} \cdot Re_{mf} = Ar \quad (17)$$

Como o número adimensional de Arquimedes,  $Ar$ , é definido pela Equação 18 como:

$$Ar = \frac{\bar{d}_p^3 \cdot \rho_f (\rho_p - \rho_f) \cdot g}{\mu^2} \quad (18)$$

As equações (17) e (18) podem ser rearranjadas para diferentes tamanhos de partículas. Para partículas muito pequenas e  $Re_{mf} < 20$  as equações podem ser simplificadas na forma:

$$U_{mf} = \frac{\bar{d}_p^2 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g}{150 \cdot \mu} \cdot \frac{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s^2}{1 - \varepsilon_{mf}} \quad (19)$$

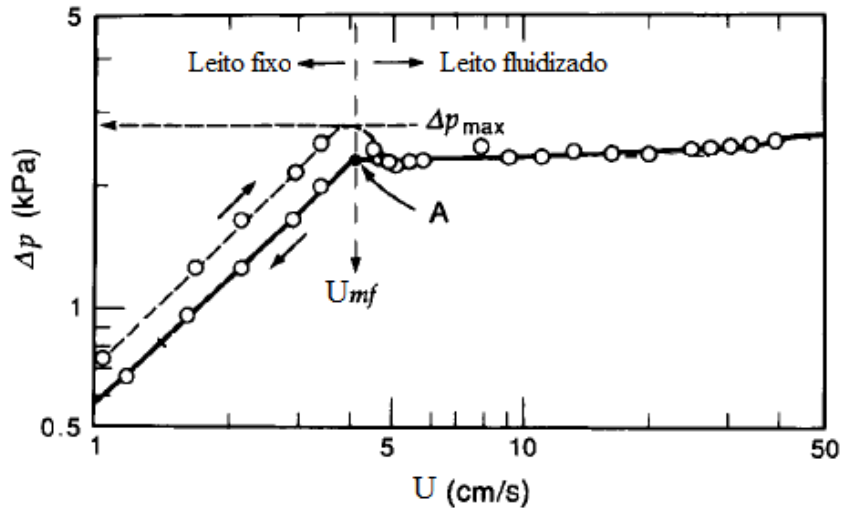
Para partículas muito grandes e  $Re_{mf} > 1000$ , se utiliza a Equação 20:

$$U_{mf}^2 = \frac{\bar{d}_p^2 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g}{1,75 \cdot \rho_f} \cdot \varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s \quad (20)$$

Um dos métodos experimentais para a determinação da velocidade mínima de fluidização é através da medida da pressão diferencial média entre dois níveis do leito e a velocidade dos fluidos através do meio fluidizado. Utilizam-se dados da diferença de pressão em função da velocidade do gás de fluidização, em um gráfico ( $\Delta P \times U$ ), onde a velocidade mínima de fluidização  $U_{mf}$  pode ser determinada pela intersecção da parte linear crescente da curva com o ponto de mudança da linha de queda de pressão do leito, onde se inicia as condições mínimas de fluidização

(CLARKE et al., 2005; KUNII & LEVENSPIEL, 1991). Esta relação está representada na Figura 12, onde o ponto A indica essa condição.

**Figura 12** - Comportamento da curva  $\Delta p$  versus  $U$  para um leito com partículas médias e de tamanho uniforme.

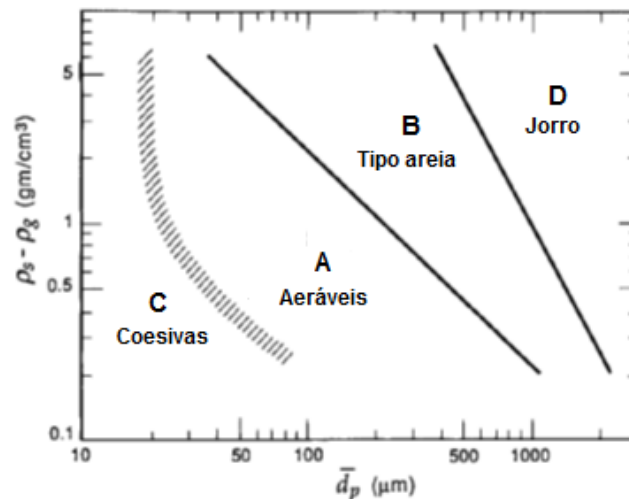


Fonte: adaptado de KUNII & LEVENSPIEL (1991).

### 3.5.3 Diagrama de Geldart

Como nem todas as partículas do meio, quando submetidas à fluidização gasosa, se comportam da mesma maneira, Geldart (1973) classificou as partículas de acordo com as propriedades de fluidização, relacionando-as em um diagrama, que relaciona a diferença entre a massa específica do sólido e do gás em função do diâmetro das partículas do leito. A classificação de grupos de Geldart é amplamente aceita e citada com frequência na literatura, embora existam outros critérios de classificação. A Figura 13 mostra os quatro grupos de partículas (A, B, C e D) do estudo de Geldart.

**Figura 13**– Diagramada classificação de partículas de Geldart para fluidização gás-sólido.



Fonte: KUNII & LEVENSPEILD (1991).

- Grupo A: compreende materiais com partículas pouco coesas, de tamanho pequeno e baixa densidade ( $<1400 \text{ kg/m}^3$ ). Durante a fluidização homogênea, estes materiais atingem uma expansão substancial do leito antes da ocorrência das bolhas. Estas bolhas aparecem em velocidades superiores à de mínima fluidização.
- Grupo B: inclui um grande grupo de materiais com partículas de tamanho médio e média densidade. Suas forças de coesão interpartículas são desprezíveis. As bolhas do fluido ocorrem imediatamente após a velocidade de mínima fluidização e ascendem com velocidade maior que a velocidade intersticial do gás. A expansão do leito na fluidização destes materiais é pequena ou inexistente. Diferentes tipos de areias são bons representantes deste grupo.
- Grupo C: as partículas são muito pequenas e coesivas, geralmente muito leves, com alto grau de umidade e de formato muito irregular. A fluidização deste tipo de partículas é extremamente difícil devido às forças de coesão entre partículas serem maiores que as forças exercidas pelo fluido. Em geral é comum ocorrer a formação de “slug” e de canais preferenciais no leito e, nestes casos, se faz a adição de um segundo material inerte para proporcionar uma fluidização eficiente.
- Grupo D: compreende partículas grandes e com alta densidade. Sua principal característica é o fato de as bolhas ascenderem lentamente, numa velocidade muito menor que a velocidade intersticial do gás. O grau de mistura do leito é

muito pequeno. A presença de partículas dentro de uma grande faixa granulométrica aumenta a possibilidade de segregação entre elas.

### 3.5.4 Reatores de leito fluidizado

As tecnologias de combustão em leito fluidizado foram adaptadas para leitos de reatores industriais e dois dos seus principais tipos são descritos neste trabalho: reatores de leito fluidizado borbulhante (RLFB) e reatores de leito fluidizado circulante (RLFC).

Os reatores de leito fluidizado borbulhante apresentam basicamente duas zonas distintas no interior do reator. A seção do leito fluidizado e a região do *freeboard*. O funcionamento dos reatores é baseado na alimentação de um combustível sólido, ou uma mistura de combustíveis sólidos, sobre um leito de partículas inertes (areia) que funciona como leito de sustentação. O agente de fluidização é o ar atmosférico, que entra pela base do reator passando através do leito, em fluxo uniforme ascendente, de maneira a fluidizar o mesmo por meio da formação das bolhas de ar.

Nos processos de combustão em leito fluidizado ocorre uma boa mistura entre o combustível e o oxigênio e com isto aumenta a velocidade de reação. A intensa mistura de partículas propicia que em todo o espaço ocupado pelo leito fluidizado ocorra a combustão sob as mesmas condições de temperatura (normalmente entre 800 e 900°C) (VAN LOO & KOPPEJAN, 2008).

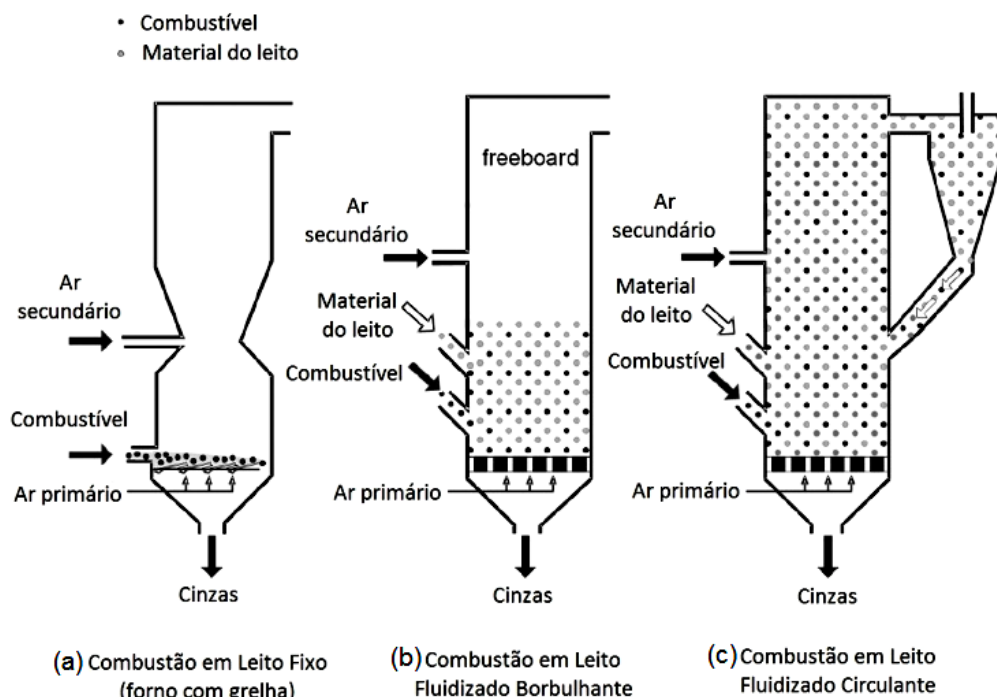
Os gases de combustão gerados deixam o leito após a passagem pela zona livre (*freeboard*), acima do leito particulado. O *freeboard* normalmente é projetado para ter uma maior área para diminuir a velocidade dos gases nesta seção, para que, com isto, as partículas de combustível não queimadas consigam retornar ao leito pela ação da gravidade, visando à completa a combustão. Por outro lado, as partículas de menores diâmetros e massas específicas, produzidas pela combustão e abrasão do leito, podem ser carregadas para fora do combustor (WU et al., 2003). Nos reatores de leito fluidizado borbulhante, as velocidades de fluidização devem ser inferiores à velocidade terminal das partículas do leito, para que não ocorra o arraste das partículas do interior do reator. Este tipo de fenômeno é desejável no

caso de operação com um leito fluidizado circulante (BASU, 2006; KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

Em Reatores de Leito Fluidizado Circulante (RLFC), os combustíveis sólidos são alimentados no leito e fluidizados através de fluxo ascendente de fluido com velocidades superiores a velocidade mínima de fluidização. Neste caso ocorre o transporte pneumático do material particulado devido às elevadas velocidades de injeção do fluido, e, dessa forma, os gases de exaustão e os sólidos elutriados (arrastados) são separados por um ciclone de alta eficiência, e o material particulado retorna ao leito para combustão.

Em alguns reatores de leito fluidizado, o ar secundário é injetado na altura do leito para a garantia de combustão completa no interior do reator e controle da temperatura no leito. A Figura 14 apresenta, de maneira simplificada, o desenho esquemático do reator de leito fixo, RLFB e RLFC.

**Figura 14** - Tipos de reatores para combustão em (a) Leito Fixo, (b) RLFB e RLFC.



Fonte: VAN LOO, The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing (2008).

### 3.5.5 Vantagens e desvantagens dos leitos fluidizados

Como qualquer técnica, os sistemas de leito fluidizado apresentam vantagens e desvantagens que deverão ser equacionadas. Entre as principais características



de operação dos sistemas de leito fluidizado apresentadas na literatura (ABELHA, 2005; GRACE et al., 1997; KUNII & LEVENSPIEL, 1991; RADOVANOVIC, 1986), destacam-se:

- os leitos fluidizados podem utilizar diferentes combustíveis, individualmente ou misturas, no mesmo reator e queimar de forma efetiva misturas de biomassas, resíduos domésticos e industriais;
- a mistura fácil dos sólidos com o ar ao longo do reator de leito fluidizado propicia a estabilidade das condições térmicas. Dessa forma, a operação pode ser controlada de forma simples e sem necessidade da instalação de equipamentos adicionais;
- a baixa temperatura de operação (800 a 900°C) dos reatores de leito fluidizado permite operar em temperaturas inferiores a de formação de óxidos de nitrogênio, reduzindo as emissões de NOx. A baixa temperatura do processo também permite que se opere em temperaturas inferiores ao ponto de fusão das cinzas, diminuindo problemas operacionais relacionados às deposições e incrustações;
- o regime turbulento nos reatores de leito fluidizado propicia a obtenção de elevados coeficientes de transferência de calor e de massa. Essas condições permitem uma combustão completa do combustível em menores temperaturas mantendo a eficiência térmica da combustão;
- a alta capacidade de troca térmica e grande área superficial específica do material do leito fluidizado possibilitam a queima de carvões de baixa qualidade, com alto grau de umidade, cinzas e enxofre, de forma mais efetiva;
- com o reciclo dos finos (em RLFC) obtém-se uma considerável economia do material do leito. Além disso, partículas do combustível não reagidas retornam ao reator, tendo chance de queimarem novamente, aumentando a eficiência de conversão.

Por outro lado, as principais limitações ou desvantagens associadas à utilização da tecnologia de leito fluidizado são:

- desgaste das superfícies de suporte e de transferência de calor por abrasão, decorrente da presença e movimentação de grandes quantidades de sólidos;

- exaustão de partículas sólidas provenientes do efeito do atrito sobre os combustíveis mais friáveis. O atrito severo ocasiona produção de material particulado, tornando necessária a recomposição da carga e equipamentos de limpeza de gás na saída;
- necessidade de maior potência instalada, no que se refere aos ventiladores ou sopradores de ar, de modo a fazer face às quedas de pressão no leito e placa distribuidora de ar. Dessa forma, os equipamentos são maiores que no leito fixo (devido à expansão do leito). Sistemas de leito fluidizado circulante apresentam maiores custos de instalação e operação;
- dificuldades na modelagem matemática de fluxos e de comportamento do leito.

### **3.6 Aplicações do processo de co-combustão em leito fluidizado**

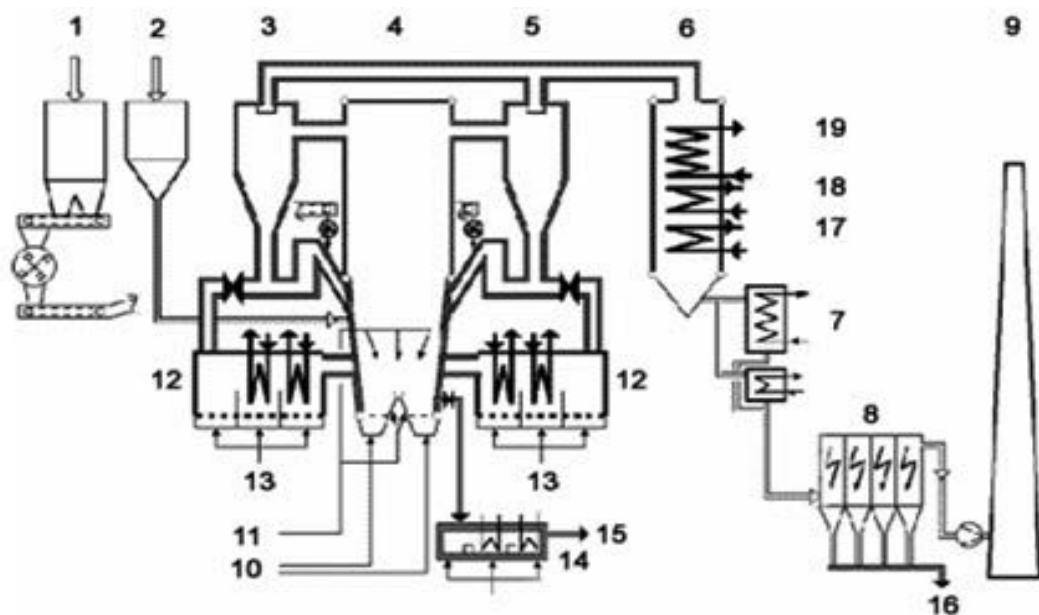
A conversão termoquímica de combustíveis sólidos em leito fluidizado teve seu início na Alemanha, com o processo de Winkler para a gaseificação de carvão mineral em 1922. No entanto, foi a partir 1940 que se diversificaram as suas aplicações como, por exemplo, no “cracking” catalítico, em processos de secagem, na síntese de polietileno, entre outras aplicações (GELDART, 1986). Embora algumas indústrias estivessem operando com este tipo de reator, foi apenas nos anos 50 e 60 que a utilização de reatores de leito fluidizado se tornou viável para a utilização destes de forma econômica e ambientalmente aceitável em processos de combustão/gaseificação com carvão (SCALA & CHIRONE, 2004).

Os processos que utilizam leito fluidizado para geração de energia são conhecidos e usados no mundo inteiro. Em países como Alemanha, Holanda e Japão, existem plantas termelétricas de leito fluidizado em operação, com capacidade de 350 MW<sub>e</sub>. Países em desenvolvimento como Índia, Turquia e China há plantas semelhantes e novos projetos em andamento. Os Estados Unidos é um dos países que mais investe neste tipo de tecnologia apresentando o maior número de patentes registradas até o ano de 2015 quando comparado aos demais países citados (ABREU, 2015; ATAKUL et al., 1993).

Uma das grandes vantagens no uso de leito fluidizado é a capacidade de promover o contato íntimo entre gás e sólidos e, por isto, as tecnologias que utilizam

leito fluidizado têm muitas aplicações, com destaque aos processos de combustão e gaseificação para geração de energia elétrica ou para a produção de calor. Uma das maiores centrais termelétricas do mundo que utiliza a tecnologia de leito fluidizado foi construída em Gardanne, na França, e está em operação desde 1995. A potência instalada nesta unidade chega a 250 MW<sub>e</sub> e queima linhito, rico em cinzas, extraído de uma mina nas proximidades. O diagrama ilustrativo na Figura 15 apresenta os principais componentes de grandes centrais térmicas que usam a combustão com a tecnologia de leito fluidizado.

**Figura 15** – Diagrama de processo de combustão em leito fluidizado.



- |                                   |                               |                             |
|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 1- Silo de combustível            | 7- Pré aquecedor de ar        | 14- Arrefecimento de cinzas |
| 2- Silo de calcário               | 8- Precipitador eletrostático | 15- Cinzas de fundo         |
| 3- Ciclone                        | 9- Chaminé                    | 16- Cinzas volantes         |
| 4- Reator de leito fluidizado     | 10- Ar primário               | 17- Água de alimentação     |
| 5- Ciclone                        | 11- Ar secundário             | 18- Vapor a média pressão   |
| 6- Área de transferência de calor | 12- Permutador de calor       | 19- Vapor a alta pressão    |
|                                   | 13- Ar                        |                             |

Fonte: adaptado de Araújo (2008)

Na combustão de biomassas e combustíveis convencionais, o leito fluidizado tem se mostrado uma das melhores tecnologias. Os motivos se apresentam em características como flexibilidade, estabilidade e boa eficiência de combustão (KHAN et al., 2009). Segundo Dai et al. (2008), este tipo de processo é apropriado para a conversão energética de resíduos agrícolas e de madeira, bem como a utilização destes em co-combustão com combustíveis fósseis.

Gogebakan et al. (2009) realizaram estudos das cinzas da co-combustão de carvão linhito, com diversos tipos de biomassas em unidade de leito fluidizado, em escala piloto, onde foram utilizados bagaço de azeitona, casca de avelã e resíduo de algodão. Os resultados mostraram baixa formação e depósito e elevadas concentrações de silício, cálcio, enxofre, ferro, e alumínio nos constituintes das amostras de cinzas.

Nos trabalhos de Suksankraisorn et al. (2010) foram realizadas co-combustão de carvão e de resíduos sólidos urbanos em escala de planta piloto com sistema de leito fluidizado borbulhante. Foram investigados os teores de umidade contidos na alimentação e as emissões durante a combustão. A fração em massa na alimentação de resíduos sólidos urbanos adicionados ao linhito foi variada em 0, 10, 20, 30 e 40%. Os autores concluíram que o efeito sinérgico da co-combustão de linhito com a biomassa mais seca reduziu a emissão de CO e com isto aumentou a eficiência da combustão.

Em outra pesquisa realizada, Akpulat et al. (2010) investigaram as emissões dos gases gerados e a eficiência da combustão na co-combustão de bagaço de azeitona e carvão. O processo foi realizado em reator de leito fluidizado borbulhante, onde observaram que, com o aumento do percentual do bagaço de azeitona na mistura combustível, aumentava as emissões de CO e diminuía as emissões de SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>.

Madhiyanon et al. (2011) utilizaram carvão e casca de arroz na co-combustão em escala piloto de leito fluidizado, sendo a casca o principal combustível na alimentação do sistema. Foram investigados os efeitos do tamanho das partículas do carvão (< 5,0 mm e 5 - 10 mm) e o ponto da alimentação no leito (acima ou abaixo de anel de recirculação) no desempenho da combustão.

Pécora et al. (2014) tentaram relacionar as propriedades físico-químicas de biomassa ao comportamento fluidodinâmico de borbulhamento em reator de leito fluidizado de bancada. As experiências foram conduzidas com injeção de ar à temperatura ambiente em leito de areia e pressão atmosférica local. Os autores notaram que as diferenças nas propriedades de cinco tipos de biomassa afetaram fortemente o comportamento fluidodinâmico de suas misturas com areia do leito.

Tokarski et al. (2015) utilizaram simultaneamente unidades de combustão e co-combustão de biomassa pulverizada em caldeiras de leito fluidizado. Neste trabalho foi realizada uma avaliação comparativa das propriedades da conversão de biomassa, como cavacos de madeira e resíduos de girassol, em eletricidade, utilizando indicadores que mostraram a quantidade da energia consumida pelos processos de conversão de diferentes biomassas nas emissões de CO<sub>2</sub>. Os autores sugerem que os indicadores determinados neste trabalho podem ser utilizados para posteriores análises energéticas, ambientais e financeiras em sistemas similares.

Além dos processos que envolvem combustão ou gaseificação, os leitos fluidizados são amplamente utilizados em operações envolvendo catalisadores, como nas reações de síntese, como a produção de óxido de etileno, anidrido ftálico, cloreto de alquila, e reações de polimerização. Ainda, encontra-se utilização na calcinação, produção de cimento Portland, craqueamento catalítico, operações de secagem de sementes e na indústria alimentícia.

### **3.7 Controle de emissões**

A escolha do sistema de combustão a ser utilizado para um determinado conjunto de condições é, na maioria das vezes, feita com base nas emissões produzidas durante a conversão termoquímica de seus combustíveis. Dessa forma, tanto a nível regional quanto a nível nacional, existem regulamentos e leis que limitam os valores de concentração dos gases produzidos e emitidos por diversos tipos de sistemas. É imprescindível que todas as instalações de combustão, independentemente da finalidade, adotem todas as medidas necessárias para cumprir os limites de emissões que são definidos pela legislação.

A prevenção e o controle de emissões de poluentes para a atmosfera definida através de princípios, objetivos, instrumentos e obrigações, no Brasil, são realizados segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. A Resolução nº 436 do CONAMA, de 22 de dezembro de 2011, estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas. Existem ainda, órgãos regionais, como exemplo, a Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Rio Grande do Sul (CONSEMA) e a Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos de estado do Paraná (SEMA), as quais tem caráter

deliberativo e normativo e são responsáveis pela aprovação e acompanhamento das implementações de políticas para o meio ambiente de cada estado, inclusive estabelecer limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos.

As espécies consideradas poluentes são aquelas que apresentam um comprovado efeito adverso para o ambiente. Por isso, existem legislações que limitam as suas emissões como, por exemplo, dos compostos  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ , e CO. Os limites de emissões, disponíveis em  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ , para estes poluentes estão apresentados na Tabela 5 com base na resolução CANAMA nº 436 de 22/12/2011.

**Tabela 5** - Limites de emissão de  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ , e CO segundo resolução do CONAMA nº 436, de 22/12/2011.

| Fontes                     | $\text{SO}_x^1$ | $\text{NO}_x^1$ | $\text{CO}^2$ | Teor de $\text{O}_2$ (%) |
|----------------------------|-----------------|-----------------|---------------|--------------------------|
| Coqueria                   | 800             | 700             | NA            | 7                        |
| Derivados da Madeira       | NA              | 650             | 3250          | 8                        |
| Biomassa de Cana de Açúcar | NA              | 350             | 1300          | 8                        |
| Central Termelétrica       | 600             | 350             | 1300          | 5                        |

<sup>1</sup> Unidade de concentração em  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ , em base seca e no teor de  $\text{O}_2$  explicitado

<sup>2</sup> Unidade de concentração em  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ , em base seca a e no teor de 8%  $\text{O}_2$

NA: Não aplicável

Fonte: CONAMA (2011)

### 3.8 Caracterização das cinzas

As cinzas da combustão e, principalmente, da co-combustão de carvão e biomassa podem causar sérios problemas no interior do combustor, tais como incrustações e corrosões na superfície dos trocadores de calor e, ainda, a sinterização das cinzas com o material do leito que diminui o tempo de vida dos equipamentos. De acordo com Hupa, (2005), cinzas de combustíveis não usuais são pouco entendidas e surpresas têm sido reportadas com relação a cinzas de misturas utilizadas dentro de reatores de leito fluidizado.

Conforme Rendeiro et al. (2008), citado por Vieira (2012), os resíduos resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidações dos inorgânicos são caracterizados como cinzas. Assim, as cinzas são resultantes da combustão da biomassa, a qual se processa em altas temperaturas, tornando-se necessário conhecimento do comportamento destas cinzas para evitar operações inadequadas. As mesmas podem originar-se de elementos metálicos já presentes nos

combustíveis; de argila, areia e sais que possam estar na biomassa e, ainda, por solos misturados a biomassa durante sua colheita ou manuseio.

As cinzas vegetais, em sua maioria, contêm cálcio, magnésio, fósforo, potássio e outros elementos, alguns essenciais para o desenvolvimento dos seres vivos (OSAKI & DAROLT, 1991). Quando presentes em alta concentração nas cinzas, esses elementos podem diminuir o poder calorífico, podem causar perda de energia e sua presença afeta também a transferência de calor sendo, portanto, necessária a remoção das mesmas (COUTO, 2014; VIEIRA, 2012).

Os metais alcalinos, especialmente o potássio (K) quando presente em alta concentração nas cinzas causa sérios problemas no interior dos combustores, pois apresenta elevada volatilidade, reage com a sílica formando silicatos com baixo ponto de fusão ou com o enxofre produzindo sulfatos alcalinos. O cloro que também está presente nas cinzas atua como um facilitador destas reações, aumentando a mobilidade do K. Os silicatos ou sulfatos produzidos têm baixos pontos de fusão e tendem, portanto, a depositar-se nas paredes do reator ou no leito, contribuindo para a aglomeração do material e, conseqüentemente, desfluidização (ARVELAKIS & FRANSEN, 2007).

De uma maneira geral, as cinzas de biomassa podem ser divididas em três grupos de acordo com a sua composição: (i) biomassa com cinzas ricas em Ca, K e pouco teor de Si; (ii) biomassa com cinzas ricas em Si e pouco teor de K e Ca, e (iii) biomassa com cinzas ricas em Ca, K e P. De uma maneira geral, as cinzas de biomassa oriundas de madeira são ricas em Ca e K (SAIDUR et al., 2011).

As principais propriedades de interesse nas cinzas determinadas em análises laboratoriais são a composição química e fusibilidade da cinza. Ghiggl et al. (2009) e Bagatini et al. (2009) analisaram o comportamento de cinzas de carvões em temperaturas altas através de testes de fusibilidade e de viscosidade e sua relação com a composição química e mineralógica. Os autores estudaram dois tipos de carvões e verificaram que o carvão prejudicial à estabilidade operacional do alto forno tinha teores excessivos de quartzo e alta viscosidade, enquanto que o carvão de bom desempenho no processo apresentava baixas temperaturas de fusibilidade e menor viscosidade.

Dessa forma, a composição química e a fusibilidade das cinzas permitem avaliar o comportamento dos carvões quanto aos seguintes aspectos:

- ataque de refratários - o ataque químico das cinzas aos refratários pode ser evitado ao escolher refratários com comportamento químico semelhante ao das cinzas. Os óxidos de elementos metálicos são básicos; os óxidos de semi-metais são geralmente ácidos, tais como óxidos de silício, zircônio e titânio; excepcionalmente, alguns óxidos são neutros, como o óxido de alumínio;
- amolecimento, fusão e sinterização das cinzas - o ensaio de fusibilidade determina a temperatura inicial e final de amolecimento da cinza. Observa-se uma influência acentuada do óxido de ferro na fusibilidade da cinza em atmosfera gasosa redutora, com sensível abaixamento da temperatura de amolecimento em relação às atmosferas oxidantes;
- sublimação e condensação de compostos - os óxidos alcalinos  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ , diferem dos demais óxidos, pois uma boa parte dos mesmos se volatiliza durante a combustão, e condensa-se em temperaturas em torno de  $760^\circ\text{C}$ ; ao condensar-se nas superfícies mais frias do equipamento aglutinam as cinzas volantes, propiciando corrosão e redução da taxa de transferência de calor nestas superfícies.

Nos processos de combustão com temperaturas superiores ao ponto de amolecimento (fusão) das cinzas pode ocorrer a aglomeração de material particulado denominado “*sinter*”, ou a fusão da cinza “*slagging*”, que geralmente inviabilizam a continuidade dos processos e/ou reduzem a eficiência da troca de calor nos equipamentos (RENDEIRO et al., 2008).



---

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

O presente trabalho iniciou-se com a caracterização e verificação das propriedades físicas e químicas dos combustíveis, seguido por testes de bancada, nos quais se estudou o comportamento fluidodinâmico dos materiais e de suas misturas em sistema de leito fluidizado borbulhante de pequena escala. Posteriormente foram realizados testes de co-combustão do RCAN e carvão mineral em sistema de planta piloto em um reator de leito fluidizado borbulhante. Este capítulo descreve as características dos materiais utilizados, bem como os procedimentos e métodos empregados para a realização do trabalho.

### **4.1 Materiais**

#### **4.1.1 Caracterização dos combustíveis**

O conhecimento e as características dos combustíveis são fatores importantes para avaliar o desempenho da fluidização e a eficiência da combustão de uma instalação de combustão em leito fluidizado. Neste contexto, torna-se fundamental o estudo das características físico-químicas da biomassa e do carvão mineral utilizados nos experimentos, para se obter, de maneira mais eficiente e adequada, os resultados no sistema instalado. Para o presente trabalho, foi realizado o estudo da fluidização e co-combustão do resíduo da casca de acácia negra (RCAN) e do carvão mineral da jazida de Candiota, como materiais combustíveis.

O resíduo de casca de acácia negra (RCAN) utilizado na pesquisa é proveniente de indústria de extração de tanino, sediada no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O carvão mineral provém da jazida de Candiota também localizada no estado do Rio Grande do Sul.

Para caracterização dos combustíveis, foram utilizadas técnicas de análise imediata, análise elementar e a utilização de bomba calorimétrica para determinação do poder calorífico inferior. Análises das características da degradação térmica das amostras de RCAN e carvões Candiota foram obtidos através das análises

termogravimétricas (TGA) realizadas em termobalança Perkin Elmer TGA7 em condições de fluxo de ar a 20 mL/min e taxa de aquecimento de 10°C/min.

Devido ao alto teor de umidade da biomassa RCAN (acima de 57% em massa) após o processo de extração do tanino e ao processo de alimentação do reator da planta piloto ser feito por meio de rosca sem fim, esta umidade elevada do material RCAN provoca entupimento e prejudica a alimentação contínua do reator. Para minimizar os entupimentos, o RCAN foi submetido a uma secagem ao ar para redução do teor de umidade e para favorecer o processo de fluidização, no fluidizador de bancada e também na alimentação do reator de leito fluidizado na planta piloto. A secagem da biomassa RCAN foi realizada ao ar em pavilhão coberto, por um período de 10 dias. O teor de umidade da biomassa, após secagem, ficou em torno de 28% em massa.

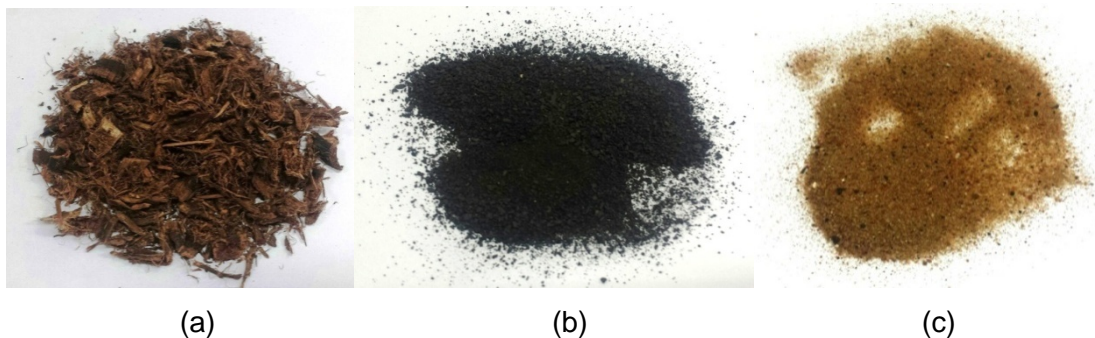
#### 4.1.2 Propriedades físicas dos materiais

A determinação das características físicas dos materiais combustíveis como tamanho de partículas, densidades real e aparente, diâmetro médio de Sauter, e também a distribuição granulométrica, foram realizadas em laboratório. O carvão mineral utilizado para os experimentos de fluidização e no processo de co-combustão foi moído nos equipamentos da Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC. O diâmetro médio de Sauter ( $D_v$ ) do carvão e da areia do leito foi determinado através da equação  $D_v = 1 / \sum(x_{aci}/d_i)$ , onde a fração de material acumulado em cada peneira ( $x_{aci}$ ) e o diâmetro da malha da peneira ( $d_i$ ) formam obtidas por peneiramento utilizando uma sequência de peneiras com abertura de malha entre 4 e 400 mesh. As massas específicas reais ( $\rho$ ) e as massas específicas aparentes ( $\rho_{apr}$ ) foram determinadas pelo método de picnometria.

A análise para a determinação da granulometria da biomassa não foi realizada por se tratar de um material fibroso e com grande variação de tamanhos das partículas e irregularidade dos formatos. No presente trabalho, optou-se pelo uso do resíduo de biomassa na forma como ele é disposto pela indústria de extração do tanino, por isto não foi realizado nenhum pré-tratamento de moagem e classificação das partículas. Os RCAN apresentaram partículas que variaram muito na forma e tamanho, com partículas muito pequenas (da ordem de microns) até

valores de aproximadamente 5 cm de comprimento. A Figura 16 apresenta as fotografias dos materiais utilizados para o trabalho.

**Figura 16** - (a) Resíduo de Casca de Acácia Negra (RCAN), (b) Carvão Candiota e (c) Areia do lastro do leito fluidizado.



## 4.2 Métodos experimentais

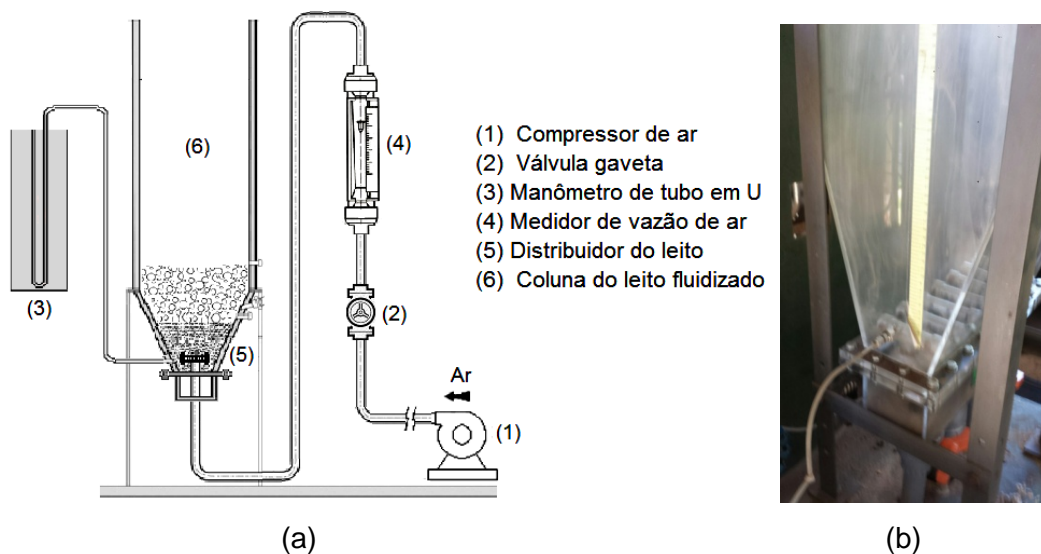
Os experimentos do presente trabalho foram realizados nos laboratórios e na planta piloto da Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC) localizada no Campus da cidade de Cachoeirinha - RS. Os itens a seguir apresentam os detalhes dos sistemas de fluidização e a metodologia experimental utilizada.

### 4.2.1 Sistema de fluidização em escala de bancada

O sistema de leito fluidizado, em escala de bancada (Figura 17), é composto pelo compressor de ar (1), válvula reguladora de fluxo (2), manômetro de tubo em U (3), controlador de vazão de ar (4) e distribuidor de ar do leito (5). A coluna de leito fluidizado (6) é feita de acrílico transparente, foi construída no formato de trapézio para manter as mesmas proporções com as dimensões do reator de leito fluidizado da planta piloto.

O sistema da planta de bancada tem um distribuidor de ar no leito composto por um conjunto de injetores de ar conectados à tubulação localizada na base do fluidizador. O compressor fornece ar para o sistema de bancada, que através da regulagem da válvula gaveta, se faz o ajuste do fluxo de ar para a fluidização dos materiais. A Figura 17a mostra esquematicamente o sistema do leito fluidizado de bancada e a Figura 17b apresenta uma fotografia do fluidizador e o distribuidor do leito em seu interior.

**Figura 17** - Sistema de fluidização de bancada (a) e imagem do fluidizador (b).



O comportamento fluidodinâmico dos combustíveis foi avaliado individualmente com diferentes quantidades relativas de biomassa e carvão Candiota que foram adicionadas com a areia do sistema de fluidização de bancada. Foram testadas misturas de RCAN e areia nas seguintes proporções: 3%, 5% e 10% em massa do RCAN e misturas de carvão e areia nas composições de 3%, 5% e 10% em massa do carvão.

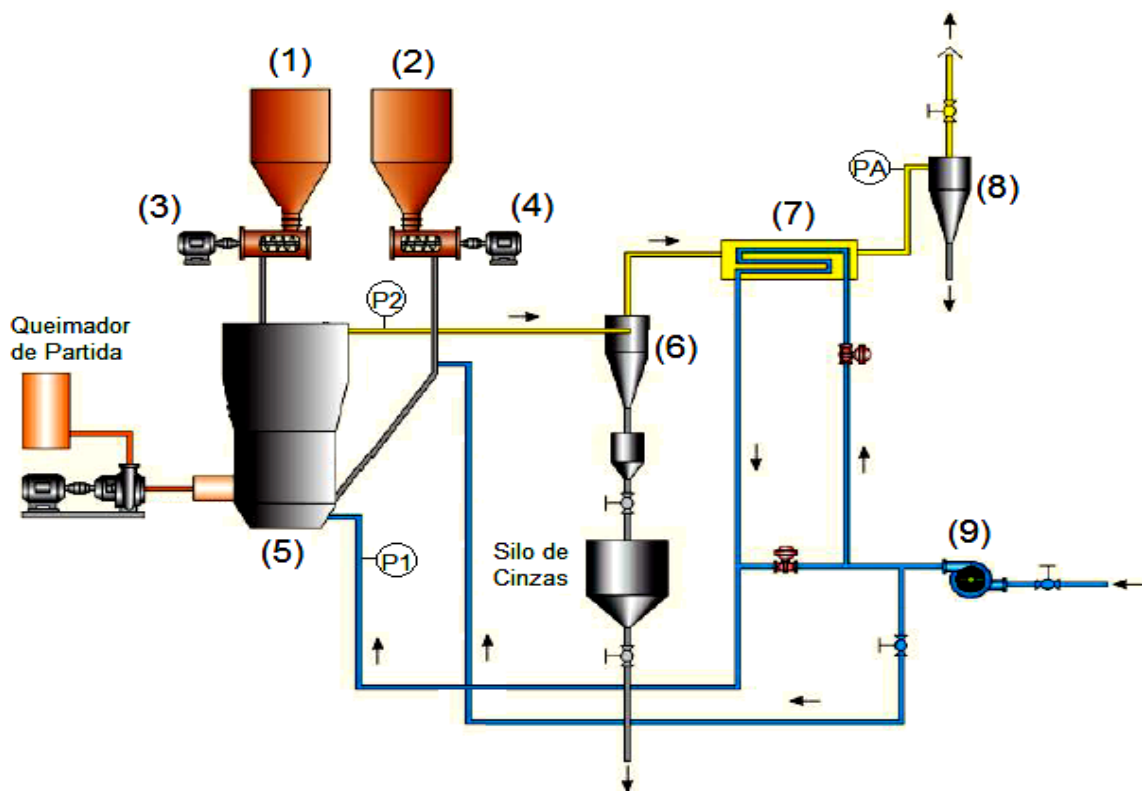
O comportamento fluidodinâmico das misturas alimentadas ao fluidizador de bancada foi avaliado variando as quantidades relativas da biomassa em relação ao carvão. Foram utilizadas misturas com RCAN e carvão nas proporções em massa de 70% Carvão : 30% Biomassa, 50% Carvão : 50% Biomassa e 30% Carvão : 70% Biomassa. Estas misturas foram adicionadas ao leito de areia obedecendo às proporções, 3%, 5% e 10% em relação à massa total do leito de areia. Para todos os experimentos, a altura do leito de areia foi mantida em 9 cm.

A análise dos perfis e a comparação das velocidades mínimas de fluidização foram avaliadas através dos gráficos gerados com os dados de perda de carga no leito ( $\Delta P$ ) em função da velocidade superficial do ar injetado no leito ( $U_s$ ) e serão discutidos no capítulo 5.

#### 4.2.2 Processo de co-combustão em planta piloto

Os experimentos de co-combustão de biomassa RCAN e carvão Candiota foram realizados na planta piloto da CIENTEC que tem um reator de leito fluidizado borbulhante com capacidade de geração de 0,25 MW<sub>t</sub>. A Figura 18 apresenta o fluxograma simplificado do processo de co-combustão com os principais equipamentos da unidade piloto.

**Figura 18** - Fluxograma do sistema de co-combustão da unidade piloto da CIENTEC: (1) silo de carvão, (2) silo de biomassa, (3) e (4) transportadores de sólidos tipo roscas sem fim, (5) reator de leito fluidizado, (6 e 8) ciclones, (7) trocador de calor, (9) ventilador de tiragem forçada.



Para a realização dos experimentos, os combustíveis foram armazenados nos silos de carvão (1) e biomassa (2) e, então, transferidos através de transportadores de sólidos tipo roscas sem fim (3) e (4) para alimentar a fornalha de leito fluidizado (5), onde ocorre a combustão. Os gases gerados na combustão passam através do ciclone de material refratário (6) para remoção de parte das cinzas volantes. Na sequência, os gases seguem pelo trocador de calor (7), onde o calor dos gases pré-aquece o ar de combustão que é alimentado no leito fluidizado e, por fim, os gases da combustão passam através de outro ciclone (8) para então serem liberados para a chaminé. O suprimento de ar para a combustão é fornecido

por um ventilador de tiragem forçada (9). Os pontos de medida de pressão do reator estão representados na Figura 18 pelos pontos P1 e P2. O ponto de amostragem (PA) dos gases da combustão está localizado após o trocador de calor (7) e é interligado ao analisador de gases HORIBA PG-250 que indica a concentração dos gases  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  e CO da saída do combustor.

A Figura 19 mostra a foto do reator da planta piloto composta de câmara de combustão de aço carbono revestida internamente com material refratário.

**Figura 19** - Foto do reator de leito fluidizado borbulhante.



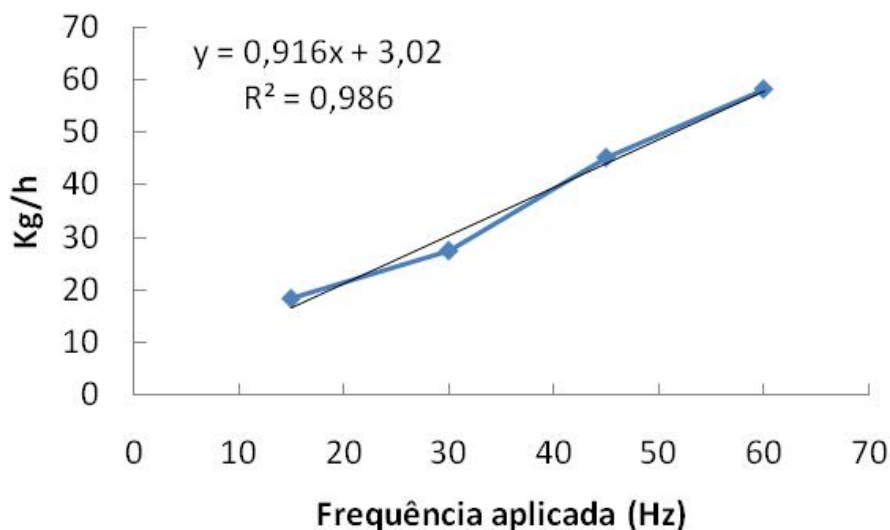
Nos experimentos realizados no presente trabalho, foram avaliadas as variações das proporções entre a biomassa RCAN e o carvão, na alimentação do reator, de tal forma que fosse garantida a manutenção da temperatura de operação do reator em  $850^\circ\text{C}$  (temperatura que garante a combustão completa de todos os componentes elementares). Os testes foram realizados com alimentação contínua no reator com as composições de 38%, 60%, 68% e 73% em massa de RCAN em relação ao carvão Candiota. A altura estática do leito de areia foi mantida a 40 cm de altura da base do leito. Para fins de comparação foram realizadas operações com condições de queima utilizando alimentação apenas do carvão Candiota.

Para a realização do presente trabalho foram realizados sete diferentes testes na planta piloto, os quais foram nomeados como Operação 01 a 07. As condições de cada operação e as análises dos gases de combustão foram realizadas após atingir

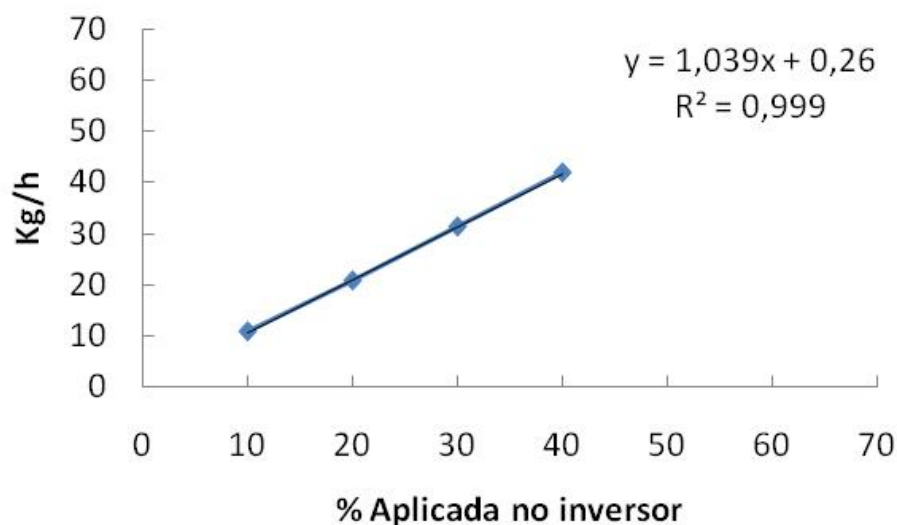
o estado estacionário do processo de combustão, ou seja, a vazões mássicas constantes e a estabilização do leito na temperatura de operação do reator (850°C).

A calibração dos transportadores tipo rosca sem-fim, da biomassa e do carvão, foi realizada através de medidas de quantidade de massa dos combustíveis após passagem pelas mesmas em intervalo determinado de tempo. Através das vazões mássicas obtidas, fez-se a regressão linear para a obtenção das equações que descrevem a alimentação de cada combustível. A Figura 20 e a Figura 21 mostram as calibrações efetuadas com a rosca de alimentação da biomassa RCAN e com a rosca de alimentação do carvão mineral, respectivamente.

**Figura 20** - Calibração da rosca de alimentação com RCAN.



**Figura 21** - Calibração da rosca de alimentação com carvão mineral.

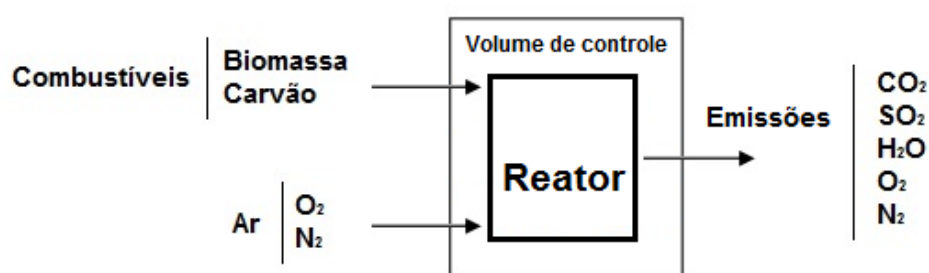




### 4.2.3 Balanço de massa, determinação do ar estequiométrico e excesso de ar no processo de co-combustão

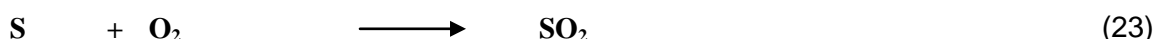
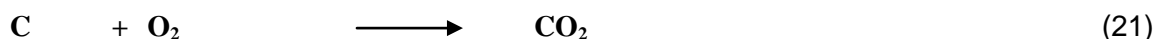
O volume de controle (VC) utilizado para o desenvolvimento do balanço de massa parcial na planta piloto é apresentado na Figura 22, onde são consideradas as entradas de combustível e ar atmosférico e apenas uma saída, a dos gases de combustão.

**Figura 22** - Representação do volume de controle considerado para a combustão e co-combustão dos combustíveis com ar atmosférico.



Na saída do volume de controle, conforme representado pela Figura 22, não está computada as cinzas provenientes do combustível, que deveria fazer parte das correntes de saída do volume de controle. Sendo assim, o balanço de massa considera apenas a saída de gases do volume de controle.

A massa de ar estequiométrico para as operações de combustão foi determinada a partir dos coeficientes estequiométricos das reações de combustão dos elementos presentes no combustível (C, H e S) e o oxigênio do ar atmosférico alimentado no reator como mostram as Equações 21, 22 e 23.



Para a determinação das quantidades molares das substâncias que entram no VC foram considerados o produto das frações mássicas em base úmida dos elementos constituintes dos combustíveis e as vazões mássicas de alimentação dos combustíveis durante cada operação. Para o ajuste das equações foi considerado



que as quantidades totais de carbono contidas nas misturas de biomassa e carvão são completamente convertidas em CO<sub>2</sub> obedecendo a Equação 21.

As frações mássicas em base úmida dos constituintes das misturas foram obtidas através da umidade do carvão e da biomassa medidas anteriormente ao início das operações de combustão e dos valores das frações mássicas dos elementos em base seca obtidos experimentalmente por análise elementar. Uma nova determinação de umidade foi necessária devido ao tempo de armazenamento da biomassa RCAN e do carvão em armazém fechado. Os valores de umidade do carvão e da biomassa foram próximos de 18 e 30% em massa, respectivamente.

A cada operação, a variação das vazões mássicas dos combustíveis adicionados no reator determinam um novo valor de oxigênio necessário para a co-combustão conforme a reação estequiométrica. A Equação 24 representa o cálculo derivado do ajuste das Equações 21, 22 e 23 para a determinação do número de mols estequiométrico de O<sub>2</sub> ( $n_{O_2}^0$ ) necessários para as reações (em mol/h) a partir dos valores molares do carbono ( $n_C^0$ ), hidrogênio ( $n_{H_2}^0$ ), enxofre ( $n_S^0$ ) e do oxigênio já existente nos combustíveis ( $n_{O_2(\text{combustível})}^0$ ).

$$n_{O_2}^0 = (n_C^0) + \frac{1}{2} \cdot (n_{H_2}^0) + (n_S^0) - (n_{O_2(\text{combustível})}^0) \quad (24)$$

Com o número de mols de O<sub>2</sub> estequiométrico ( $n_{O_2}^0$ ), e sabendo-se que o percentual em massa de O<sub>2</sub> presente no ar atmosférico é de 23,2%, determina-se a quantidade ar consumida estequiometricamente para cada operação no reator. Assim, a massa de ar estequiométrica pode ser obtida a partir da quantidade de matéria ou número de mols ( $n_{Ar}$ ), que relaciona o número de mols estequiométrico do ar à massa de ar estequiométrica ( $m_{Ar}$ ), assim como a sua massa molar ( $MM_{Ar} = 28,84$  g/mol), expressa pela Equação 25.

$$n_{Ar} = \frac{m_{Ar}}{MM_{Ar}} \quad (25)$$

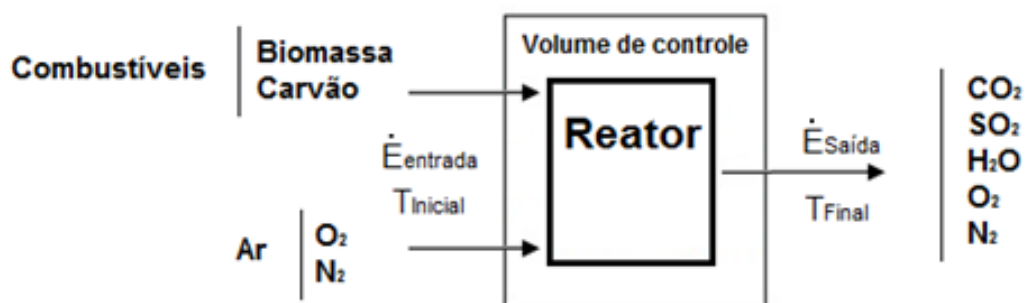
Por fim, com a obtenção da massa de ar estequiométrico (em kg/h), a porcentagem de excesso de ar no reator é obtida através da diferença entre a massa de ar estequiométrico e a vazão mássica de ar de alimentação no reator para cada operação de combustão e co-combustão realizada no sistema de planta piloto.

#### 4.2.4 Balanço de energia no reator

O balanço de energia tem como objetivo de determinar a quantidade de calor gerado durante as operações de combustão da biomassa e do carvão. Para efetuar o balanço de energia considerou-se a operação do leito fluidizado em estado estacionário e a geração de calor por combustão dos elementos carbono, hidrogênio e enxofre que são oxidados a  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{SO}_2$ . Dessa forma, se estabeleceu as equações que contabilizam os diferentes fluxos de entrada e saída de energia do volume de controle para cada uma das operações realizadas.

O volume de controle foi definido como os limites do sistema pelos quais existem trocas de energia dentro do reator, excluída qualquer troca térmica por condução ou radiação nas paredes do equipamento, uma vez que as paredes do reator são revestidas com material refratário e considerou-se, também, a temperatura homogênea no interior do reator. As trocas de energia podem ser vistas na Figura 23, onde os termos  $\dot{E}_{\text{Entrada}}$  e  $\dot{E}_{\text{Saída}}$  representam as energias de entrada e saída do volume de controle, respectivamente, acompanhadas das temperaturas  $T_{\text{Inicial}}$  e  $T_{\text{Final}}$  de entrada e saída no reator.

**Figura 23** - Representação do volume de controle com entrada e saída de fluxos de energia do leito fluidizado.



Segundo o primeiro princípio da termodinâmica, da conservação da energia, a variação de energia total de um sistema durante um processo será igual à diferença entre a energia total que entra e a energia total que sai do sistema durante esse processo (Equação 26).

$$\dot{E}_{\text{Entrada}} - \dot{E}_{\text{saída}} = \Delta \dot{E}_{\text{sistema}} = \dot{q}_{\text{gerado}} \quad (26)$$

Sendo,  $\dot{E}_{\text{entrada}}$  a energia total a entrar no volume de controle,  $\dot{E}_{\text{saída}}$ , a energia total a sair do volume de controle e  $\Delta\dot{E}_{\text{sistema}}$ , a variação da energia total do sistema. O calor “ $\dot{q}_{\text{gerado}}$ ” pode ser descrito de acordo com a Equação (27), sendo função das diferenças dos estados de saída (subscrito “s”) e entrada (subscrito “e”) dos elementos no volume de controle, onde o termo “h” representa a entalpia de cada componente a uma dada temperatura. Pela lei da conservação da energia, na Equação (28), o subscrito “P” e o subscrito “R” referem-se aos produtos e aos reagentes, respectivamente.

$$\dot{q} = \sum_P \dot{m}_s \cdot h_s - \sum_R \dot{m}_e \cdot h_e \quad (27)$$

Os valores de entalpia (e outras propriedades termodinâmicas) não podem ser obtidos a partir de medidas diretas, porém podem ser calculados a partir de outros dados determinados de maneira experimental. Os valores de entalpia padrão de formação foram obtidos por tabelas a temperatura de 25°C e pressão de 1 atm (HIMMELBLAU & RIGGS, 2012).

Embora o conceito de entalpia de formação seja bastante útil, ela é tabulada para apenas algumas substâncias. Isto ocorre porque os carvões e biomassas, por exemplo, são materiais compostos por inúmeras substâncias cujas quantidades relativas podem variar bastante de acordo com o material envolvido. Moran & Shapiro (2006) consideram que o PCI é um número positivo semelhante ao chamado módulo de entalpia de combustão que é definida como a diferença entre a entalpia padrão dos produtos e a entalpia padrão dos reagentes ( $\Delta h_{RP}$ ), em uma combustão completa do combustível sob temperatura e pressão controladas. Sendo assim, estes autores definem a entalpia de combustão de acordo com a Equação 28.

$$PCI = \Delta h_{RP} = \sum_P \dot{n}_i (h_f^0)_s - \sum_R \dot{n}_i (h_f^0)_e \quad (28)$$

Considerando o princípio da conservação de energia na Equação 27 em sistemas reagentes, o balanço de energia em um VC em sistemas de combustão operando em regime permanente pode ser reescrito de acordo com a Equação 29.

$$\dot{q} = \sum_P \dot{m}_s \cdot (h_f^0)_s - \sum_R \dot{m}_e \cdot (h_f^0)_e + \sum_P \dot{m}_s \cdot (\Delta h)_s - \sum_R \dot{m}_e \cdot (\Delta h)_e \quad (29)$$

Na Equação 29 observa-se a entalpia de combustão (PCI) como sendo a diferença entre o somatório das entalpias de formação dos produtos “P” e reagentes “R”. Assim, a Equação 29 pode ser reescrita na forma da Equação 30.

$$\dot{q} = \dot{m}_{\text{combustível}} \cdot \text{PCI}_{\text{combustível}} + \sum_P \dot{m}_s \cdot (\Delta h)_s - \sum_R \dot{m}_e \cdot (\Delta h)_e \quad (30)$$

Onde,  $\dot{m}_{\text{combustível}}$  representa o valor das vazões de alimentação e  $\text{PCI}_{\text{combustível}}$  o poder calorífico em base úmida de cada combustível alimentado no reator. Dessa forma, a energia contida nos elementos dos combustíveis é contabilizada na forma do PCI obtido experimentalmente e ajustado a sua base úmida sendo contabilizados os componentes elementares existentes na forma de entalpia de combustão. Na Equação 30, o  $\text{PCI}_{\text{combustível}}$  e as entalpias dos produtos e reagentes ( $\Delta h$ ) estão em termos de energia por unidade de massa.

Por fim, transformando as vazões mássicas dos componentes em análise por seus respectivos números de mols (ou taxa molar) na Equação 30 (a exceção das vazões mássicas de combustíveis) chega-se à Equação 31. Nesta equação as entalpias dos compostos gerados na reação e as entalpias dos componentes do ar de combustão são obtidas em termos de energia/mol. Dessa forma, é calculado o calor gerado no processo de co-combustão durante as operações no reator de leito fluidizado borbulhante em unidades energia por tempo (potência).

$$\dot{q} = \dot{m}_{\text{combustível}} \cdot \text{PCI}_{\text{combustível}} + (\dot{n}_{\text{CO}_2} \cdot \Delta h_{\text{CO}_2} + \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta h_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{n}_{\text{O}_2} \cdot \Delta h_{\text{O}_2} + \dot{n}_{\text{N}_2} \cdot \Delta h_{\text{N}_2})_s - (\dot{n}_{\text{O}_2} \cdot \Delta h_{\text{O}_2} + \dot{n}_{\text{N}_2} \cdot \Delta h_{\text{N}_2})_e \quad (31)$$

#### 4.2.5 Análise dos gases

A análise dos gases de combustão na saída do reator foi realizada de forma contínua para  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  e CO visando atender a legislação ambiental de acordo com a resolução CONAMA Nº 436 de 2011. O ponto de amostragem (PA) dos gases da combustão está localizado após o trocador de calor da planta piloto (Figura 18) e é interligado ao sistema de análise de gases. A Figura 24 mostra uma fotografia do equipamento da marca HORIBA PG-250 que mede a concentração dos compostos  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  e CO nos gases de saída do sistema na planta piloto.

**Figura 24** – Analisador de gases.

#### 4.2.6 Caracterização das cinzas

Os mecanismos pelos quais a qualidade das cinzas afeta a estabilidade operacional dos combustores ainda não estão bem estabelecidos, mas há indícios de que a composição das mesmas influencia na estabilidade do leito fluidizado. Dessa forma, para o presente estudo foi realizada a análise das cinzas de combustão através de difração de raios X (DRX). A obtenção de difratograma qualitativo foi realizada utilizando difratômetro de raios-X RIGAKU, sistema D/MAX - 2100. Para os testes as amostras foram finamente moídas em gral de ágata e submetidas à varredura angular de  $3^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  empregando o método do pó. As condições experimentais são descritas a seguir: tubo de raios-X com ânodo de cobre, natureza da radiação Cu Ka, tensão de trabalho 40 kV, corrente aplicada 20 mA, velocidade de varredura  $2^{\circ}/\text{min}$  e intervalo de leitura (passo) de  $0,020^{\circ}$ . O objetivo desta análise foi verificar a presença de compostos cristalinos nas cinzas geradas com as misturas do carvão mineral e do RCAN após a co-combustão, assim como, em amostras das cinzas da combustão individual dos combustíveis.

Neste sentido foram obtidas amostras do carvão Candiota e das misturas, 70% carvão : 30% RCAN, 60% carvão : 40% RCAN e 40% carvão : 60% RCAN as quais seguiram para carbonização em mufla na temperatura de operação do leito da

planta piloto (850°C) . As cinzas geradas foram submetidas à análise de DRX e a testes de fusibilidade. Os testes de fusibilidade das cinzas dos combustíveis auxiliam na compreensão do comportamento desse material em altas temperaturas, indicando os estágios de amolecimento, fusão e deformação. Para os testes de fusibilidade foi utilizado microscópio de aquecimento até 1.750°C da Hesse Instruments, modelo HR 18, segundo a norma DIN-51730/2007-09.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos experimentalmente. Em resumo, serão reportados os dados experimentais relativos à caracterização dos combustíveis, aos testes de fluidização no sistema de bancada, assim como as operações realizadas na planta piloto de leito fluidizado.

### 5.1 Análise imediata, análise elementar e poder calorífico

Os resultados das análises imediata, elementar e determinação do Poder Calorífico Inferior, assim como as normas de realização das análises estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6** - Análise imediata, análise elementar, poder calorífico inferior em base como recebida ( $PCI_{bcr}$ ) e normas experimentais aplicadas ao resíduo de casca de acácia negra (RCAN) e carvão Candiota.

| Combustível                   | RCAN   | Carvão Candiota | Normas           |
|-------------------------------|--------|-----------------|------------------|
| Análise Imediata (% massa)    |        |                 |                  |
| Carbono fixo <sup>a</sup>     | 20,0   | 22,0            | ASTM D 7582/10   |
| Cinza <sup>a</sup>            | 3,8    | 55,0            | ASTM D 7582/10   |
| Matéria volátil <sup>a</sup>  | 76,2   | 23,0            | ASTM D 7582/10   |
| Umidade total                 | 57,6   | 17,1            | ASTM D 7582/10   |
| Análise Elementar (% mássica) |        |                 |                  |
| C <sup>a</sup>                | 51,3   | 33,8            | ASTM D 5373/14   |
| H <sup>a</sup>                | 5,1    | 2,3             | ASTM D 5373/14   |
| S <sup>a</sup>                | 0,1    | 1,9             | ASTM S 4239/11   |
| N <sup>a</sup>                | 1,4    | 0,6             | ASTM D 5373/14   |
| O <sup>a</sup>                | 39,5   | 6,4             | ASTM D 5373/14   |
| Poder calorífico (kJ/kg)      |        |                 |                  |
| $PCI_{bcr}$ <sup>b</sup>      | 7815,7 | 10112,7         | ABNT-NBR 8633/84 |

<sup>a</sup> base seca, <sup>b</sup> base úmida.

Conforme se observa na Tabela 6, os resultados da análise imediata apresentaram valores semelhantes para o teor de carbono fixo nos combustíveis RCAN e carvão mineral. A biomassa RCAN apresentou o maior teor de material volátil e de umidade em relação ao carvão Candiota. O elevado teor de cinzas no carvão supera os 50% em massa, enquanto que para a biomassa não ultrapassa

4%. Os resultados da análise elementar mostram que a biomassa RCAN apresenta um teor de carbono elementar acima de 50% em massa (base seca), sugerindo que estes resíduos podem ser aproveitados energeticamente (SMOLINSKI et al., 2011; AL-SHEMMERI et al., 2015).

Ainda, o RCAN apresentou um teor de enxofre de 0,1% em massa, bem abaixo dos 1,9% apresentados pelo carvão mineral. O teor de enxofre obtido na biomassa corrobora com os valores citados na literatura (SAMI et al., 2001; STREIBEL et al., 2015). Os resultados para a análise imediata e elementar obtidos neste trabalho demonstram concordância com os resultados obtidos por Faé Gomes et al. (2013) e Brachi et al. (2014).

A Tabela 7 apresenta os valores ajustados das porcentagens mássicas em base úmida dos elementos constituintes do carvão e da biomassa e que foram utilizados para os cálculos dos balanços de massa no reator.

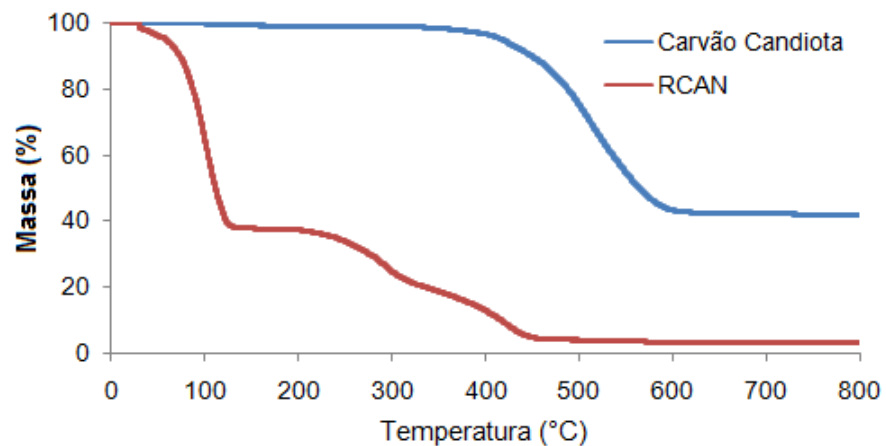
**Tabela 7** - Valores ajustados das porcentagens mássicas em base úmida do RCAN e carvão utilizados nos cálculos dos balanços de massa no reator.

| Elementos  | Carvão Candiota<br>(% base úmida) | RCAN<br>(% base úmida) |
|------------|-----------------------------------|------------------------|
| Carbono    | 28,05                             | 37,94                  |
| Oxigênio   | 5,30                              | 29,16                  |
| Hidrogênio | 1,93                              | 3,82                   |
| Nitrogênio | 0,59                              | 1,01                   |
| Enxofre    | 1,58                              | 0,07                   |
| Umidade    | 17,09                             | 28,00                  |

## 5.2 Análise termogravimétrica (TGA)

A Figura 25 apresenta as curvas de análise térmica TGA para as amostras do carvão Candiota e da biomassa RCAN realizadas em termobalança com condições de fluxo de ar de 20 mL/min e taxa de aquecimento a 10°C/min. A decomposição térmica para ambos os materiais apresenta três regiões distintas, onde se observa duas perdas de massa bem definidas e uma mais discreta. Segundo Magdziarz & Wilk (2013) a primeira perda de massa observada na curva de TGA é decorrente da liberação de umidade e de matéria volátil que constitui cada combustível.



**Figura 25** - Análise termogravimétrica (TGA) do carvão Candiota e biomassa RCAN.

A curva TGA para biomassa RCAN apresenta uma elevada perda de massa com o aumento da temperatura até 110°C, o que corresponde ao alto teor de umidade deste material e a sua conseqüente liberação. Este comportamento era esperado ao se considerar que a biomassa derivada do processo de extração do tanino apresentou elevado teor de umidade como apresentado na Tabela 6 (57,6 % em massa). Seguindo o aumento da temperatura para o RCAN, conforme observado na Figura 25, uma segunda região de perda de massa pode ser identificada entre 110°C a 450°C, a qual está relacionada à decomposição da celulose e da hemicelulose presentes na biomassa. A terceira perda de massa bem mais discreta ocorre a partir dos 450°C e está relacionada à degradação da lignina também presente na biomassa (EDREIS et al., 2013; PÉCORA et al., 2014).

Quanto ao comportamento térmico do carvão Candiota, praticamente não se observa perda de massa até 350°C. A curva TGA apresenta uma grande perda de massa entre 350°C e 600°C, devido à degradação dos grupos carboxílicos presentes no carvão. Segundo Reichel et al. (2013) os grupos carboxílicos são pouco estáveis e iniciam sua decomposição térmica acima de 400°C.

Ao comparar o comportamento da combustão do carvão Candiota ao da biomassa, as curvas TGA mostram que o RCAN apresenta maior facilidade de ignição devido à maior presença de componentes voláteis que são mais instáveis termicamente. Ainda, como mostrado na Figura 25, a biomassa RCAN apresenta significativa perda de massa entre 200°C e 600°C. Dessa forma é importante que a alimentação da biomassa no reator ocorra o mais próximo possível do leito fluidizado, ou mesmo no interior do leito, de modo a evitar uma perda de calor para

zonas indesejáveis ou, ainda, o aparecimento de gradiente de temperatura no interior do reator (VASSILEV et al., 2013).

### 5.3 Propriedades físicas dos materiais

As propriedades físicas dos materiais utilizados demonstram uma diferença significativa entre a densidade real e a densidade aparente da casca de acácia e do carvão de Candiota, conforme apresentado na Tabela 8, a seguir.

**Tabela 8** - Diâmetros médios e massas específicas dos materiais.

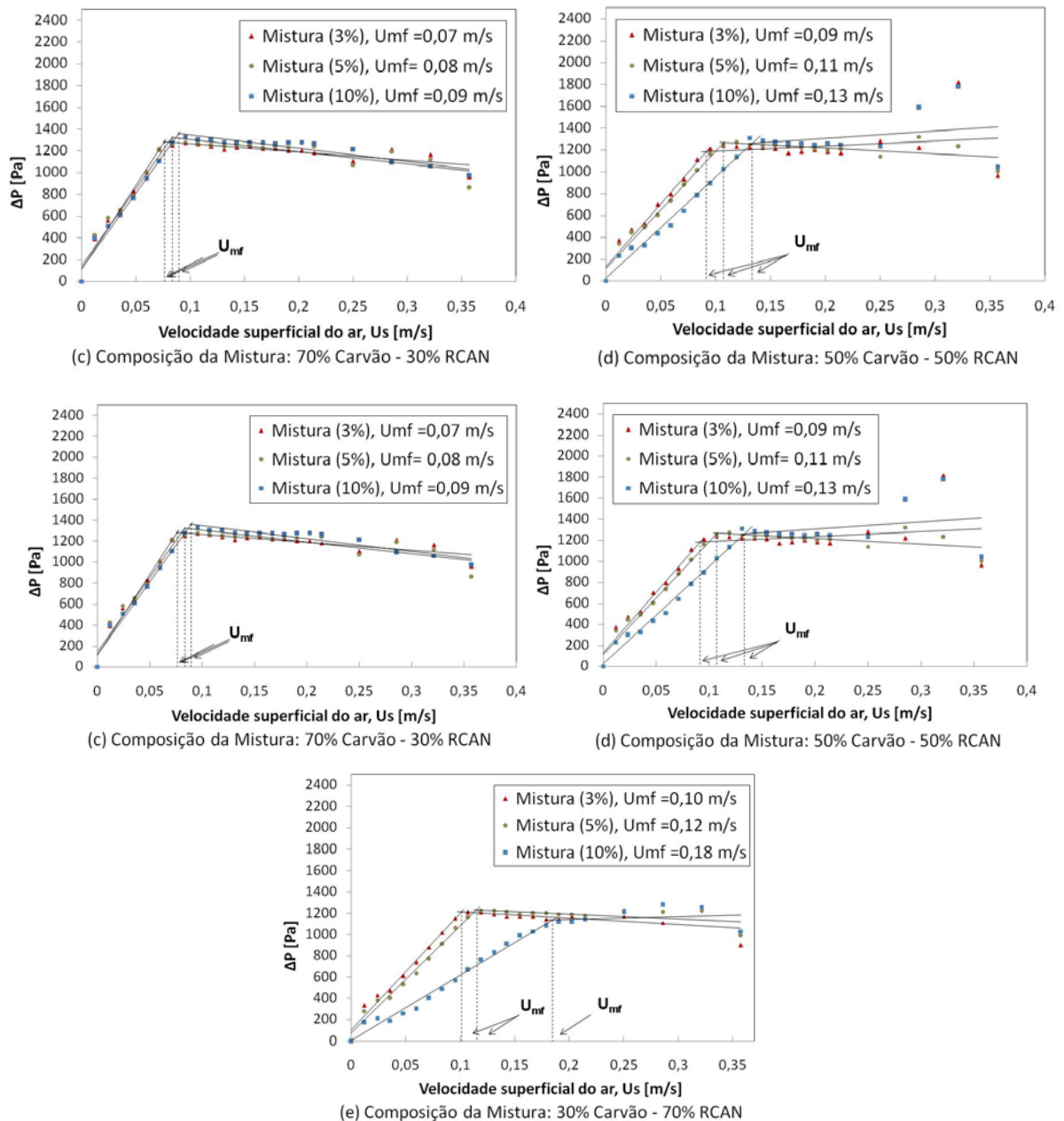
| Parâmetro                         | Casca de Acácia | Carvão Candiota | Areia do Leito |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| $D_s$ (mm)                        | -               | 0,35            | 0,37           |
| $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )       | 0,47            | 1,66            | 2,55           |
| $\rho_{apr}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 0,42            | 1,37            | 2,46           |

A areia utilizada no leito apresentou maior densidade real dentre os materiais utilizados no presente estudo (2,55 g/cm<sup>3</sup>) e se observou a menor densidade real da biomassa RCAN (0,47 g/cm<sup>3</sup>) em comparação com o carvão Candiota (1,66 g/cm<sup>3</sup>). Os diâmetros médios de *Sauter* das partículas do carvão e da areia apresentaram valores bem próximos (0,35 e 0,37 mm, respectivamente), lembrando que estes materiais passaram por peneiramento, enquanto o formato do RCAN foi mantido como recebido. Esta heterogeneidade com relação às diferenças de densidade entre os combustíveis pode resultar em problemas de segregação dentro do reator e ocasionar um diferencial na temperatura no leito durante a co-combustão.

### 5.4 Velocidade mínima de fluidização “ $U_{mf}$ ” das misturas

A Figura 26 apresenta as quedas de pressão ( $\Delta P$ ) medidas em função das velocidades superficiais do gás ( $U_s$ ) para as diferentes concentrações do RCAN e do carvão Candiota no interior do leito fluidizado de areia em escala de bancada.

**Figura 26** - Queda de pressão ( $\Delta P$ ) versus velocidade superficial de ar ( $U_s$ ) para os testes em escala de bancada para diferentes composições, sendo: (a) RCAN e Areia, (b) Carvão e Areia, (c) 70% Carvão : 30% RCAN, (d) 50% Carvão:50% RCAN e (e) 30% Carvão : 70% RCAN.



Foram realizados 3 testes com as misturas de RCAN e areia nas proporções de 3%, 5% e 10% em massa da biomassa (Figura 26a). Similarmente foram realizados 3 testes para a mistura carvão e areia nas composições de 3%, 5% e 10% em massa de carvão (Figura 26b). Também foram realizados testes de fluidização com misturas de RCAN e carvão nas proporções em massa 70% carvão : 30% RCAN, 50% carvão : 50% RCAN e 30% carvão : 70% RCAN. Cada composição mencionada de biomassa e carvão foi utilizada para realizar testes de fluidização com leito de areia obedecendo as proporções de 3%, 5% e 10% em relação a

massa total do leito de areia. As Figura 26c, 26d e 26e, representam a queda de pressão medida em função da  $U_s$  do ar para as composições de RCAN e carvão mencionadas. A altura do leito foi mantida em 9 cm para todos os testes.

Através dos testes realizados, pode-se observar que as curvas de queda de pressão nas Figuras 26a a 26e têm um padrão similar, onde em um primeiro estágio, quando a velocidade superficial do gás é baixa, a queda de pressão total ( $\Delta P$ ) aumenta com o aumento da velocidade do gás e as partículas permanecem estagnadas (caracterizando leito fixo). Com o aumento da velocidade superficial, a força acessível provocada pela queda de pressão torna-se igual ao peso aparente dos sólidos do leito e seguindo o aumento de velocidade do ar o leito é totalmente fluidizado. O método gráfico apresentado por Kunni & Levenspiel (2001) foi aplicado nos gráficos da Figura 26 para a determinação da velocidade mínima de fluidização " $U_{mf}$ " de cada composição utilizada durante os testes de fluidização e seus valores podem ser observados na Tabela 9.

**Tabela 9** - Velocidade mínima de fluidização ( $U_{mf}$ ) dos materiais e das suas misturas durante os testes em leito fluidizado em escala de bancada.

| % da mistura no leito | RCAN | Carvão | Carvão:RCAN 70:30 | Carvão:RCAN 50:50 | Carvão:RCAN 30:70 |
|-----------------------|------|--------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 3%                    | 0,11 | 0,10   | 0,07              | 0,09              | 0,10              |
| 5%                    | 0,15 | 0,11   | 0,08              | 0,11              | 0,12              |
| 10%                   | 0,23 | 0,10   | 0,09              | 0,13              | 0,18              |

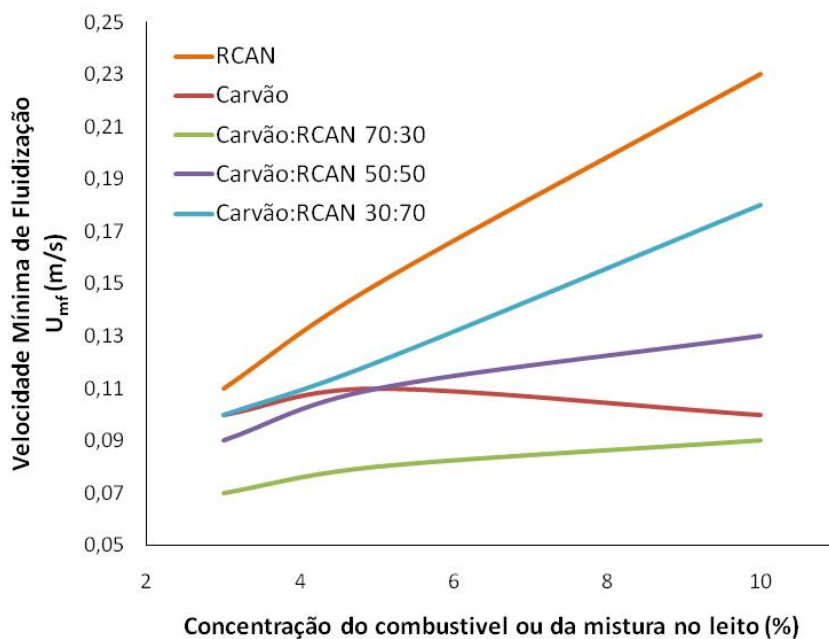
Todas as velocidades são apresentadas em unidades de m/s.

Entre as misturas de carvão e areia (Figura 26b) foram observadas pequenas diferenças nas  $U_{mf}$ . Por outro lado, as fluidizações da mistura RCAN e areia apresentaram variações maiores nos valores de  $U_{mf}$  (0,11 a 0,23 m/s), sendo que a queda de pressão  $\Delta P$  diminuiu com o aumento da concentração de biomassa no leito. Este comportamento pode estar associado à formação de caminhos preferências com a utilização da biomassa RCAN. O mesmo comportamento, com relação ao aumento da  $U_{mf}$  e diminuição do  $\Delta P$ , foi observado na mistura de 30% carvão : 70% RCAN (Figura 26e), porém as velocidades de fluidização e a queda de pressão variaram com menor intensidade. Os resultados experimentais para  $U_{mf}$  e  $\Delta P$  nas composições ternárias areia + carvão + RCAN (Figura 26c, 26d e 26e) foram próximos do comportamento das misturas binárias de carvão e areia, com exceção

da queda de pressão  $\Delta P$  que teve pouca variação para que se atingisse a velocidade de mínima fluidização.

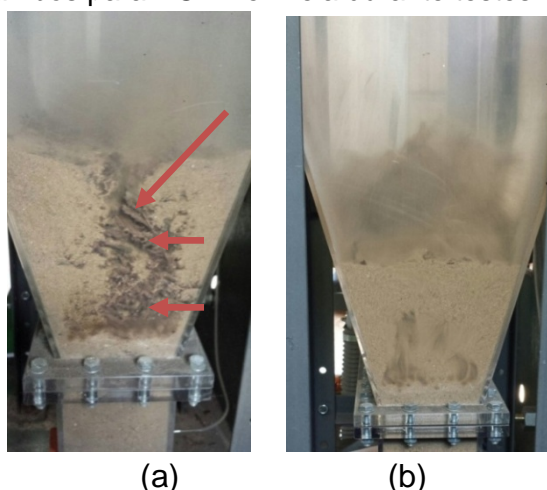
A Figura 27 mostra a variação das velocidades mínimas de fluidização, obtidas nos testes realizados na planta de bancada, em função das porcentagens dos materiais utilizados no leito de areia. Observa-se que, para o RCAN e para as misturas utilizadas, a  $U_{mf}$  aumenta conforme aumenta a concentração da biomassa ou da mistura no leito. Utilizando somente carvão e areia, a  $U_{mf}$  praticamente se mantém com o aumento da concentração de carvão no leito.

**Figura 27** - Velocidade mínima de fluidização ( $U_{mf}$ ) em função da porcentagem dos compostos RCAN e Carvão, e das misturas 70% Carvão : 30% RCAN, 50% Carvão : 50% RCAN e 30% Carvão:70% RCAN aplicadas aos testes no leito fluidizado de bancada.



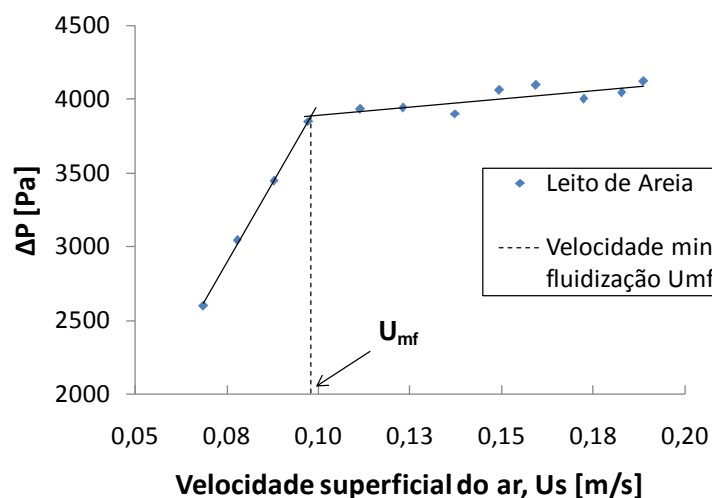
A Figura 28 mostra imagens do leito fluidizado durante os testes realizados com RCAN com uma concentração de 10% em massa do total de leito. A Figura 28a exhibe os caminhos preferenciais formados pelo RCAN perto da parede do reator de leito fluidizado com velocidades pouco acima da velocidade mínima de fluidização (0,23 m/s). A Figura 28b apresenta a biomassa imersa no leito completamente fluidizado onde o ar escoava com velocidade acima de 0,30 m/s, ou seja, com uma velocidade acima da mínima de fluidização.

**Figura 28** - Imagem dos leitos com (a) detalhe da disposição da biomassa e (b) leito totalmente fluidizado ambos para RCAN e Areia durante testes no sistema de bancada.



O teste de fluidização no sistema de planta piloto de leito fluidizado foi realizado com a passagem de ar através do leito de areia com altura igual a utilizada na operação do processo de co-combustão, obedecendo as proporções do leito fluidizado de bancada. Através dos testes realizados na planta piloto, pode-se notar que a curva de queda de pressão, representada na Figura 29, tem um comportamento similar aos testes realizados em escala de bancada com uma velocidade mínima de fluidização,  $U_{mf}$ , de aproximadamente 0,10 m/s. Este valor é similar ao encontrado para a velocidade mínima de fluidização nos testes realizados em escala bancada utilizando-se baixas concentrações de RCAN e carvão.

**Figura 29** - Queda de pressão ( $\Delta P$ ) versus velocidade superficial ( $U_s$ ) para teste no sistema planta piloto de leito fluidizado borbulhante.



### 5.5 Co-combustão e parâmetros de operação da planta piloto

A Tabela 10 apresenta as condições operacionais realizadas durante 7 operações avaliadas na planta piloto. As operações 01 e 02 correspondem aos testes realizados unicamente com carvão mineral na alimentação do reator. As operações 03 a 07 apresentam dados dos testes de co-combustão do RCAN em proporções de alimentação que foram de 38% (operação 03) até 73% (operação 07) em relação ao carvão Candiota no reator de leito fluidizado borbulhante. Por meio dos parâmetros obtidos durante as operações e dos balanços de massa realizados no reator da planta piloto obteve-se a quantidade de ar estequiométrico e o excesso de ar necessário para os processos de combustão e co-combustão.

**Tabela 10** - Condições operacionais das operações em planta piloto de combustão.

| Operações  | 01    | 02    | 03    | 04    | 05    | 06    | 07    |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| % (Carvão:RCAN)  | 100:0 | 100:0 | 62:38 | 62:38 | 40:60 | 32:68 | 27:73 |
| $m_{\text{Carvão}}$ (kg/h)   | 27,30 | 27,30 | 15,85 | 15,85 | 10,65 | 7,50  | 8,57  |
| $m_{\text{RCAN}}$ (kg/h)   | 0     | 0     | 9,62  | 9,62  | 16,21 | 16,21 | 22,81 |
| $m_{\text{Ar}}$ (kg/h)   | 192,7 | 191,9 | 191,6 | 171,7 | 199,0 | 172,9 | 195,6 |
| $m^{\text{O}}_{\text{O}_2\text{esteq}}$ (kg <sub>O<sub>2</sub></sub> /h) | 23,6  | 23,6  | 23,3  | 23,3  | 25,4  | 22,7  | 30,2  |
| $m^{\text{O}}_{\text{Ar}_{\text{esteq}}}$ (kg <sub>Ar</sub> /h)          | 101,2 | 101,3 | 100,1 | 100,1 | 109,1 | 97,5  | 129,7 |
| Excesso de Ar (%)  | 108,4 | 107,5 | 109,1 | 87,8  | 99,7  | 94,2  | 65,2  |
| $\Delta P_{\text{leito}}$ (mmCA)   | 605   | 634   | 765   | 869   | 888   | 764   | 893   |
| $T_{\text{leito1}}$ (°C)   | 852   | 847   | 857   | 857   | 850   | 857   | 853   |
| $T_{\text{leito2}}$ (°C)   | 855   | 853   | 865   | 863   | 856   | 862   | 859   |

As vazões mássicas do carvão, da biomassa RCAN e do ar atmosférico que alimentam o reator estão representadas por  $m_{\text{Carvão}}$ ,  $m_{\text{RCAN}}$  e  $m_{\text{Ar}}$ , respectivamente. O parâmetro  $m^{\text{O}}_{\text{O}_2\text{esteq}}$  refere-se à massa de oxigênio estequiométrica e  $m^{\text{O}}_{\text{Ar}_{\text{esteq}}}$  refere-se à massa de ar estequiométrica, ambas calculadas a partir das reações de combustão (Equações 21, 22 e 23). A porcentagem de excesso de ar no reator foi calculada a partir das massas de ar estequiométrico  $m^{\text{O}}_{\text{Ar}_{\text{esteq}}}$  e das vazões mássicas de ar insuflado no reator,  $m_{\text{Ar}}$ . O parâmetro  $\Delta P_{\text{leito}}$  refere-se à diferença de pressão antes e depois do leito fluidizado. Os parâmetros  $T_{\text{leito1}}$  e  $T_{\text{leito2}}$  representam as temperaturas no interior do leito e a temperatura logo acima do leito fluidizado, respectivamente.

Os resultados das operações 01 e 02 utilizando carvão Candiota na Tabela 10 não apresentaram variações significativas nos parâmetros de operação em planta piloto. A alimentação do carvão se manteve a mesma nas duas operações (27,3 kg/h) e os parâmetros de operação praticamente se repetiram para a estabilização da temperatura do leito fluidizado na temperatura de operação a 850°C, à exceção da queda de pressão do leito  $\Delta P_{\text{leito}}$ . Com relação às operações de co-combustão (operações 03 a 07), para que estas atingissem a temperatura de operação do leito (próximo a 850°C) foram necessárias menores porcentagens de excesso de ar no reator em comparação com a queima unicamente de carvão. Em particular, na condição 07 pode se observar a menor porcentagem de excesso de ar (65,2%) para a estabilização da temperatura em comparação às operações 01 e 02. Esta necessidade de ajuste do processo como excesso de ar vem a ser consequência da elevada quantidade de biomassa na corrente de alimentação, que em comparação com o carvão, possui menor poder calorífico e um teor de umidade maior (Tabela 6), além do maior conteúdo de material volátil. Sendo assim, condições de operação mais próximas à estequiométrica foram necessárias para a manutenção da temperatura do leito em torno de 850°C (GOMES, 2013).

## 5.6 Balanço de energia no sistema de planta piloto

No balanço de energia para o processo de co-combustão utilizou-se a Equação 31 para avaliação do calor gerado durante as operações no reator de leito fluidizado borbulhante. O poder calorífico inferior dos combustíveis em base como recebido ( $PCI_{\text{bcr}}$ ) obtido experimentalmente (Tabela 6) foi ajustado à umidade dos mesmos, a qual foi medida anteriormente a alimentação no reator. Dessa forma, os valores ajustados do poder calorífico foram chamados de Poder Calorífico Inferior ajustado a umidade ( $PCI_{\text{au}}$ ) e estão apresentados na Tabela 11 com os respectivos teores de umidade para cada combustíveis.

**Tabela 11** - Poder Calorífico Inferior ajustado a umidade e umidade dos combustíveis.

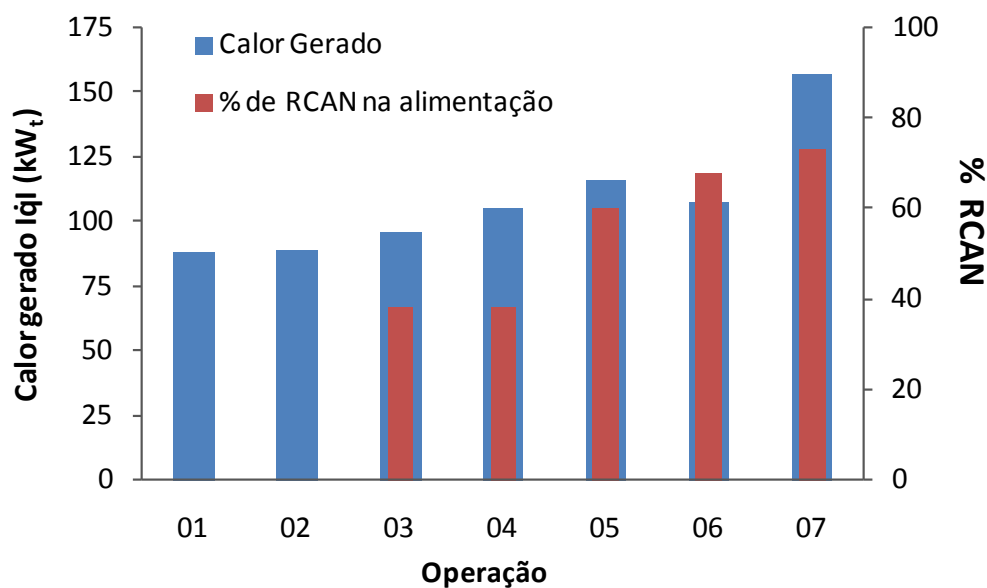
| Combustível | $PCI_{\text{au}}^1$ (kJ/kg) | Umidade (%) |
|-------------|-----------------------------|-------------|
| RCAN        | 13278,9                     | 28,0        |
| Carvão      | 10112,7                     | 17,1        |

<sup>1</sup> Resultado expresso em base úmida referente ao teor de umidade explicitado.



O balanço de energia foi realizado nas operações 01 a 07 do sistema de planta piloto de leito fluidizado. O cálculo do calor gerado nas operações de combustão do carvão e co-combustão do carvão com a biomassa foi obtido a partir da temperatura de referência (25°C) até a temperatura média de operação do reator (850°C) como exemplificado no item 4.2.4. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 30 em módulo, na unidade de  $\text{kW}_t$ , juntamente com as porcentagens de biomassa RCAN utilizadas para cada operação realizada no reator.

**Figura 30** - Calor gerado nas operações de combustão e co-combustão e porcentagem de biomassa aplicada nas operações.

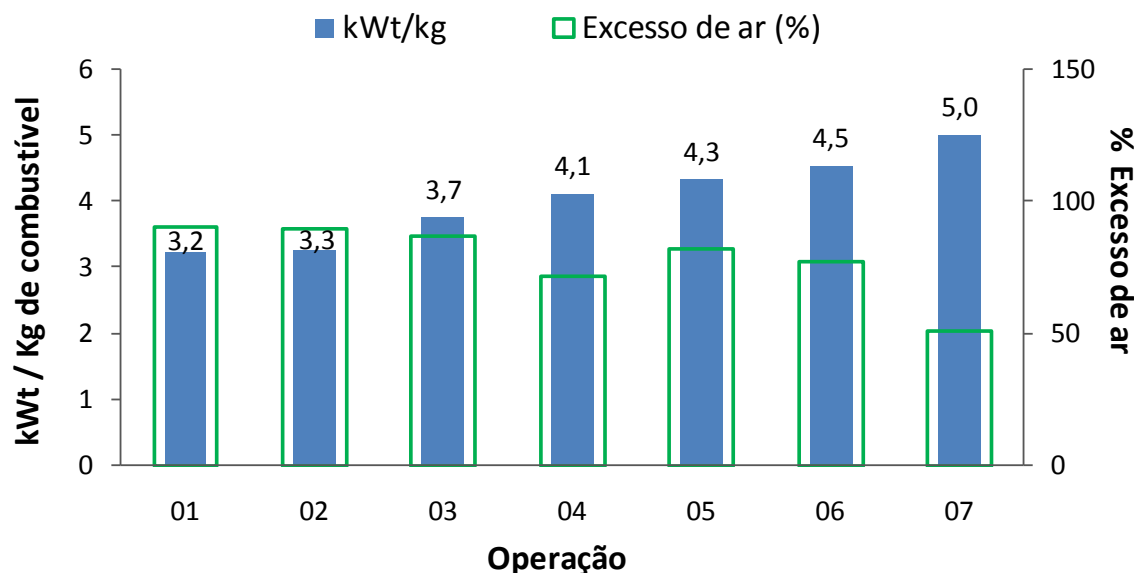


Através da Figura 30 se observa que os calores obtidos entre as operações 01 a 06 apresentaram pouca variação independentemente do aumento da biomassa RCAN na corrente de alimentação do reator, sendo que estas operações resultaram em uma média de  $100 \text{ kW}_t$  gerados, à exceção da operação 07, que apresentou alta variação em relação as demais operações, onde o calor gerado chegou a  $157 \text{ kW}_t$  no interior do reator. Este fato, em parte, se deve à maior vazão mássica na alimentação dos combustíveis, carvão e RCAN, no reator em comparação às operações 01 a 06. A vazão total de alimentação, de carvão e biomassa, atingiu  $31,4 \text{ kg/h}$  durante a operação 07, enquanto que a média das vazões mássicas nas operações 01 a 06 foi de  $26 \text{ kg/h}$ .

O gráfico da Figura 31 apresenta os valores dos calores gerados por unidade de combustível na alimentação (carvão e biomassa) para cada operação realizada

no reator da planta piloto. Desta forma, as variações nas vazões mássicas de alimentação dos combustíveis foram normalizadas para todas as operações.

**Figura 31** - Calor gerado por kg de combustível alimentado no reator e excesso de ar aplicado nas operações 01 a 07.



Pode-se observar que os calores gerados variaram no leito, passando de 3,2 kW<sub>t</sub>/kg de combustível até 5,0 kW<sub>t</sub>/kg de combustível, entre a operação 01 em que se utilizou somente carvão na alimentação do reator e a operação 07 em que se utilizou 73% de RCAN e 27% de carvão na alimentação do reator, respectivamente. Esta variação está relacionada à vazão mássica da biomassa RCAN na alimentação, o maior poder calorífico inferior (PCI<sub>au</sub>) em relação ao carvão Candiota e às diferenças na composição dos combustíveis, principalmente com relação à água, o carbono e o enxofre. A Tabela 7, mostrada no item 5.1, apresentou os valores da análise elementar dos combustíveis ajustados às respectivas umidades utilizados na co-combustão. Pode-se observar as diferenças entre os constituintes do carvão Candiota e da biomassa RCAN, onde a biomassa RCAN apresentou cerca de 9% a mais de carbono e mais de 10% de umidade em comparação ao carvão Candiota.

Para melhor análise do balanço de energia, os valores utilizados para os cálculos da operação 01 e da operação 07 estão detalhados na Tabela 12. Na referida tabela são relacionados os valores de entalpia (poder calorífico inferior no caso da biomassa e do carvão Candiota) e número de mols dos constituintes dos combustíveis obedecendo as reações de combustão e utilizando a Equação 31 para obtenção do calor gerado durante as duas operações (expresso em kJ/h).

**Tabela 12** - Balanço de energia para a operação 01 e para a operação 07 no reator de leito fluidizado borbulhante.

| Entrada a 25°C   |                         |                         |   | Entrada a 25°C   |                         |                         |   |
|--|-------------------------|-------------------------|---|--|-------------------------|-------------------------|---|
| Operação 01  | $\dot{m}$               | $\Delta h_e$            | $\dot{m} \times \Delta h$               | Operação 07  | $\dot{m}$               | $\Delta h_e$            | $\dot{m} \times \Delta h$               |
| Componentes  | (mol/h)                 | (kJ/kg)                 | (kJ/h)                                  | Componentes  | (mol/h)                 | (kJ/kg)                 | (kJ/h)                                  |
| Biomassa   | 0                       | 13044,0                 | 0                                       | Biomassa   | 22,81*                  | 13044,0                 | 297534,0                                |
| Carvão   | 27,3*                   | 10112,7                 | 275774,1                                | Carvão   | 8,6*                    | 10112,7                 | 86666,1                                 |
| O <sub>2</sub>   | 1448,0                  | 0                       | 0                                       | O <sub>2</sub>   | 1425,0                  | 0                       | 0                                       |
| N <sub>2</sub>   | 8463,6                  | 0                       | 0                                       | N <sub>2</sub>   | 8585,1                  | 0                       | 0                                       |
| CO <sub>2</sub>  | 0                       | 0                       | 0                                       | CO <sub>2</sub>  | 0                       | 0                       | 0                                       |
| SO <sub>2</sub>  | 0                       | 0                       | 0                                       | SO <sub>2</sub>  | 0                       | 0                       | 0                                       |
| H <sub>2</sub> O   | 258,9                   | -31,0                   | -8038,1                                 | H <sub>2</sub> O   | 436,2                   | -31,0                   | -13542,7                                |
| Saída a 850°C  |                         |                         |   | Saída a 850°C  |                         |                         |   |
| Operação 01  | $\dot{n}_{\text{mols}}$ | $\Delta h_s$            | $\dot{n}_{\text{mols}} \times \Delta h$ | Operação 07  | $\dot{n}_{\text{mols}}$ | $\Delta h_s$            | $\dot{n}_{\text{mols}} \times \Delta h$ |
| Componentes  | mol/h                   | H <sub>s</sub> (kJ/mol) | kJ/h                                    | Componentes  | mol/h                   | H <sub>s</sub> (kJ/mol) | kJ/h                                    |
| Biomassa   | 0                       | 0                       | 0                                       | Biomassa   | 0                       | 0                       | 0                                       |
| Carvão   | 0                       | 0                       | 0                                       | Carvão   | 0                       | 0                       | 0                                       |
| O <sub>2</sub>   | 665,8                   | 27,1                    | 18055,3                                 | O <sub>2</sub>   | 479,8                   | 27,1                    | 13011,3                                 |
| N <sub>2</sub>   | 8463,6                  | 25,5                    | 215917,7                                | N <sub>2</sub>   | 8585,1                  | 25,5                    | 219017,9                                |
| CO <sub>2</sub>  | 637,4                   | -353,4                  | -225246,9                               | CO <sub>2</sub>  | 903,5                   | -353,4                  | -319286,1                               |
| SO <sub>2</sub>  | 13,5                    | -255,9                  | -3455,3                                 | SO <sub>2</sub>  | 4,8                     | -255,9                  | -1227,5                                 |
| H <sub>2</sub> O   | 263,1                   | -210,6                  | -55421,4                                | H <sub>2</sub> O   | 505,6                   | -210,6                  | -106496,9                               |
| Balanço de Energia   |                         |                         |   | Balanço de Energia   |                         |                         |   |
| $\dot{q}$ (kJ/h) = $\Sigma_s \dot{m} \cdot \Delta h - \Sigma_e \dot{n} \cdot \Delta h = -317886,6$ |                         |                         |   | $\dot{q}$ (kJ/h) = $\Sigma_s \dot{m} \cdot \Delta h - \Sigma_e \dot{n} \cdot \Delta h = -565638,3$ |                         |                         |   |

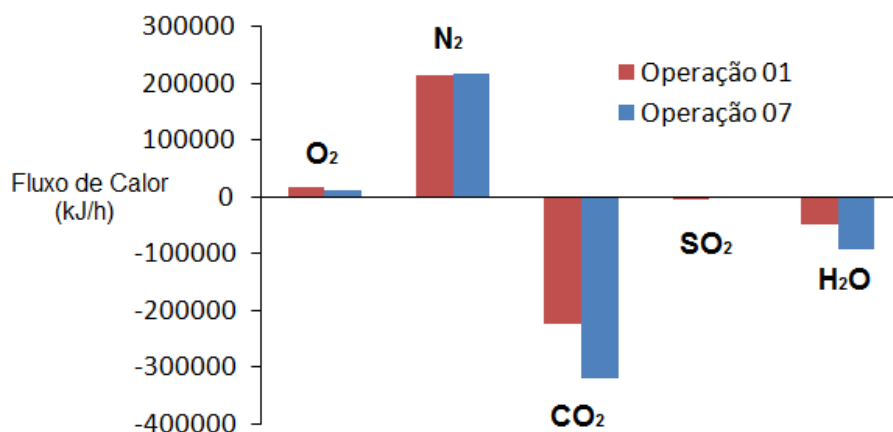
\* unidade de vazão de entrada da biomassa e do carvão em kg/h.

O balanço de energia no sistema para as operações 01 e 07 apresentado na Tabela 12, destaca a maior característica exotérmica da operação 07 de co-combustão (-565.638,3 kJ/h), em comparação com a combustão do carvão na operação 01 (-317.886,6 kJ/h). Apesar da maior vazão mássica na operação 07, como já mencionado, a diferença entre os calores gerados entre as duas operações é resultado, novamente, das características das composições químicas dos combustíveis. Vale ressaltar que apesar do maior poder calorífico do carvão Candiota, este possui menor número de carbonos elementares na sua constituição (em base úmida) em comparação à composição da biomassa RCAN, como observado nos resultados da fração mássica dos combustíveis (Tabela 7). Desta forma, a composição na alimentação da operação 07, com maior quantidade de biomassa possui maior número de mols de carbono que a operação 01 e, conseqüentemente, gera maior número de mols de CO<sub>2</sub> após as reações de combustão. Através dos dados da Tabela 12 se observa que a energia gerada pela

formação de  $\text{CO}_2$  na operação 07 na saída dos gases a  $850^\circ\text{C}$  ( $-319.286,1 \text{ kJ/h}$ ) é cerca de 40% maior que a energia de formação da  $\text{CO}_2$  na operação 01 ( $-225.246,9 \text{ kJ/h}$ ). Assim, tem-se uma maior energia (relativa à energia de formação das moléculas de  $\text{CO}_2$ ) liberada durante a operação 07 em comparação à operação 01 que utiliza unicamente o carvão mineral como combustível.

Fazendo uma análise do balanço das entalpias correspondentes aos gases envolvidos na saída do reator e desconsiderando a contribuição energética dos combustíveis, a Figura 32 compara o calor gerado pelos gases de saída do sistema nas operações 01 e 07. Os valores negativos das entalpias dos gases representam a energia liberada de cada composto e os valores positivos representam a absorção de energia pelos gases para a passagem da temperatura de entrada ( $25^\circ\text{C}$ ) até a temperatura de operação do sistema ( $850^\circ\text{C}$ ).

**Figura 32** - Entalpias relativas aos componentes do ar e dos gases de combustão na saída do volume de controle para as operações 01 e 07.

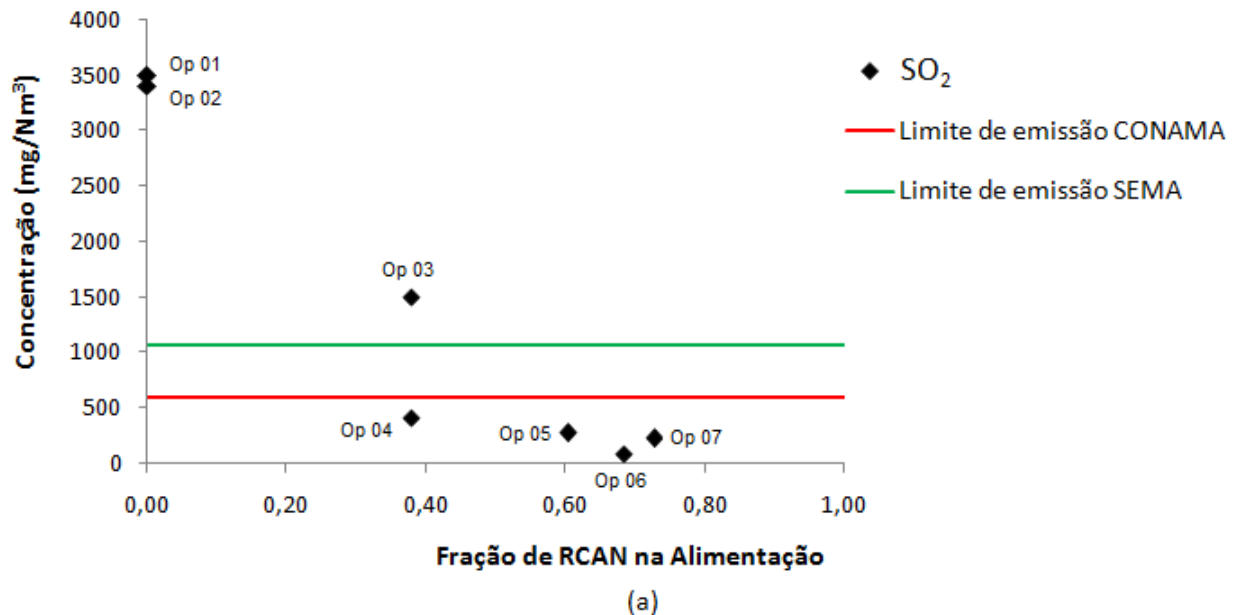


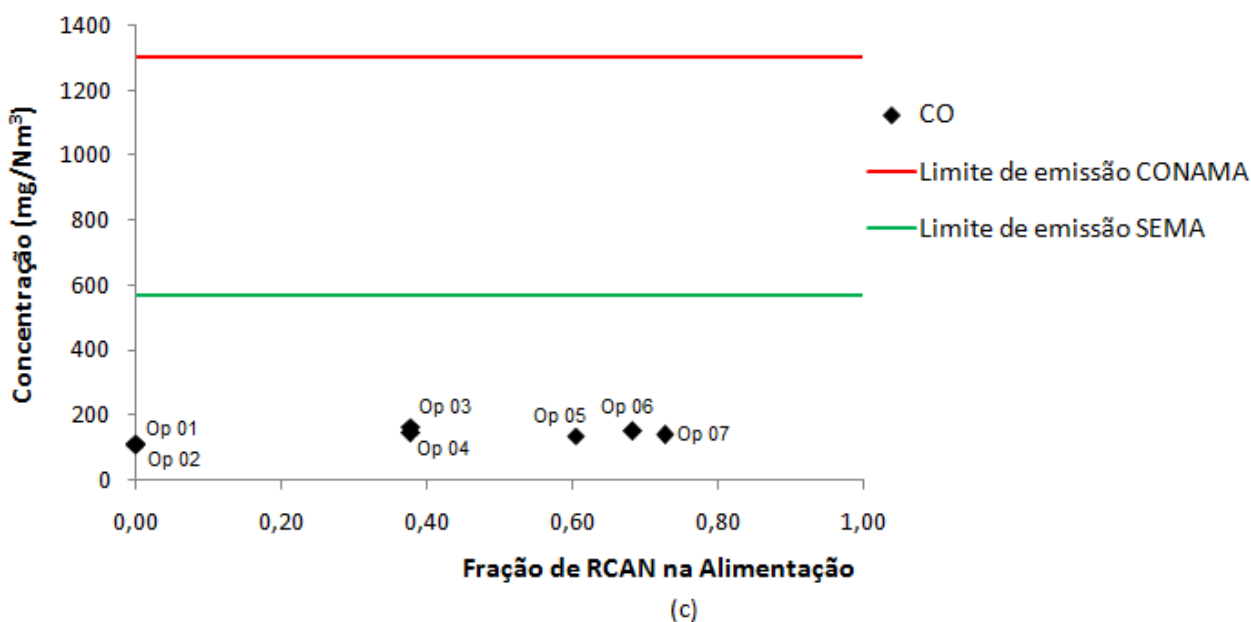
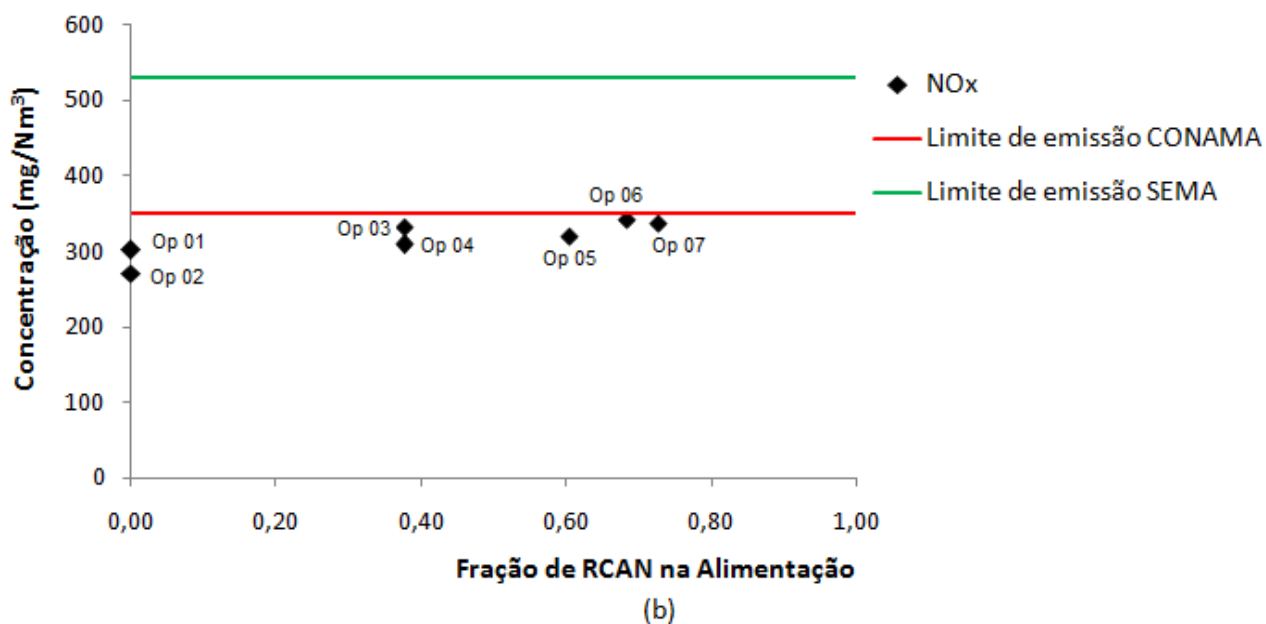
Através da Figura 32 pode-se comparar as grandezas dos calores gerados de cada substância nos gases de saída. A contribuição energética do  $\text{CO}_2$  no balanço de energia atinge cerca de 70% da energia liberada nos gases de saída da combustão. Ainda, verificam-se menores contribuições energéticas do  $\text{H}_2\text{O}$  e do  $\text{SO}_2$  para ambas as operações. A absorção de energia referente ao nitrogênio também pode ser observada na Figura 32. A participação no balanço de energia deste gás inerte que está presente no ar injetado no reator se dá através do seu aquecimento desde a temperatura de  $25^\circ\text{C}$  na entrada do volume de controle até a temperatura de saída do reator próximo de  $850^\circ\text{C}$ .

### 5.7 Emissões de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, e CO

Entre as espécies consideradas poluentes (espécies que apresentam um comprovado efeito adverso para o ambiente, e que por isso, existe uma legislação que limita as suas emissões), encontram-se o SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e CO. A Figura 33 mostra as concentrações dos compostos presentes nos gases de combustão na saída do sistema da planta piloto em função das frações de RCAN utilizadas nas operações 01 a 07. Os limites das emissões dos compostos também foram expressos nos gráficos com base na legislação federal vigente (resolução CONAMA N° 436 de 2011) para instalações termelétricas e na resolução estadual da Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do estado do Paraná (resolução SEMA N° 016 de 2014) para geração de calor ou energia utilizando carvão mineral e combustão de biomassa de cana de cana de açúcar. As concentrações dos limites das resoluções estão expressos na unidade de concentração mg/Nm<sup>3</sup> em base seca e ajustadas ao teor de O<sub>2</sub> de 5%.

**Figura 33** - Concentrações de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e CO nos gases de saída da planta piloto de co-combustão em leito fluidizado.





Na Figura 33a, percebe-se claramente um decréscimo significativo na concentração de  $\text{SO}_2$  a partir da adição de biomassa RCAN na alimentação do reator. Apenas as operações com carvão e uma operação de co-combustão, onde se utilizou 38% biomassa na alimentação com carvão, apresentaram concentrações de  $\text{SO}_2$  acima do limite legal de emissão do CONAMA ( $600 \text{ mg/Nm}^3$ ) e SEMA ( $1060 \text{ mg/Nm}^3$ ). As operações com composições de alimentação do reator acima de 60% de RCAN apresentaram concentrações de  $\text{SO}_2$  abaixo dos limites de emissão estabelecido pelas resoluções CONAMA e SEMA chegando a uma diminuição das concentrações de  $\text{SO}_2$  nos gases gerados em mais de 90% em massa.

Pode-se observar, ainda, concentrações consideráveis de NO<sub>x</sub> nos gases de combustão (Figura 33b) para as operações na planta piloto. Este fato está associado ao teor de nitrogênio elementar presente na composição dos combustíveis de alimentação (Tabela 6) e da oxidação do nitrogênio do ar. A reação que gera essencialmente NO<sub>x</sub>, é afetada pela temperatura de combustão, que acima de 1.400°C favorece exponencialmente a formação de NO. Por esse motivo, o uso de reatores de leito fluidizado representa uma vantagem, uma vez que nestes reatores a temperatura de combustão não costuma ultrapassar 900°C.

As baixas concentrações de monóxido de carbono (CO) detectadas nos gases de saída do reator (Figura 33c) não apresentaram variações consideráveis durante o processo de co-combustão. Os valores de concentração obtidos para o CO estão significativamente abaixo dos limites de emissão estabelecidos pelas resoluções CONAMA e SEMA. Contudo, estas concentrações indicam combustão incompleta do carbono constituinte dos combustíveis (IDEIAS, 2008; KUPRIANOV et al., 2011).

## 5.8 Caracterização das cinzas

As cinzas da combustão e, principalmente, da co-combustão de carvão e biomassa podem causar sérios problemas no interior do combustor. De acordo com Hupa, (2005), cinzas de combustíveis não usuais são pouco entendidas e inúmeras surpresas têm sido reportadas com relação a cinzas de misturas utilizadas dentro de combustores de leito fluidizado.

A Figura 34 exhibe o difratograma de raios-X das cinzas geradas em diferentes misturas submetidas à co-combustão, assim como também da combustão do carvão utilizado. Na análise dos difratogramas, apenas as cinzas da mistura 40% carvão e 60% RCAN (mistura utilizada com maior teor de biomassa), apresentou algumas fases distintas que não estão presentes na cinza de combustão de carvão. Este resultado era esperado, pois o teor de cinzas na biomassa RCAN é de somente 1,60% em base como recebida contra 45,57% para o carvão utilizado. De qualquer maneira, destaca-se nesta cinza a presença de quartzo (SiO<sub>2</sub>) como a fase predominante, seguida de hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e anidrita (CaSO<sub>4</sub>). Nas cinzas da mistura 40% carvão e 60% RCAN destaca-se ainda, a presença de óxido de cálcio (CaO) e de calcita (CaCO<sub>3</sub>) como substâncias geradas a partir do elevado teor de

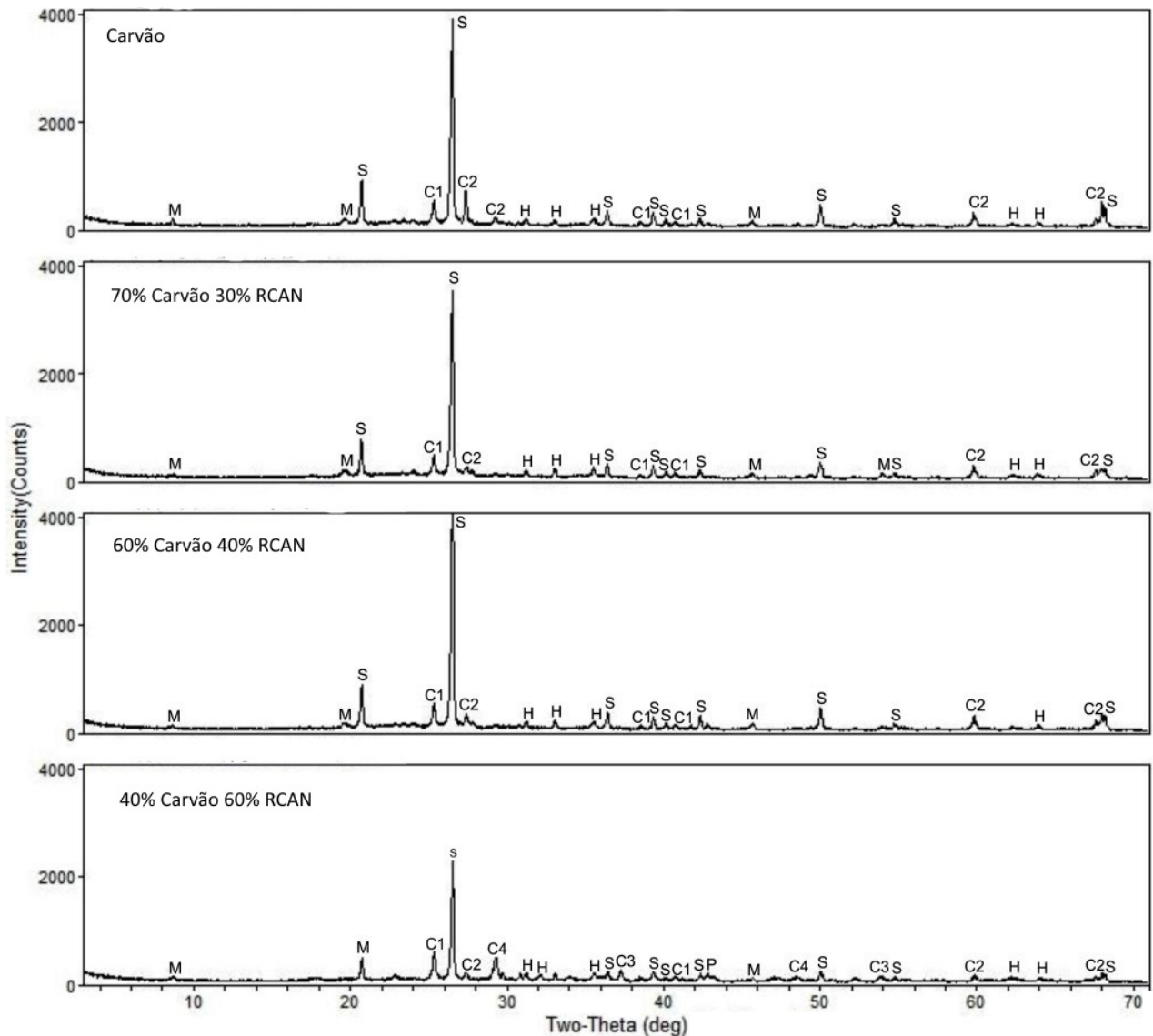
Ca usualmente presente em cinzas de biomassa de madeira, assim como o aparecimento de MgO. Quanto à formação de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) na cinza da mistura 40% carvão e 60% RCAN, Vassilev et al. (2013) comentam que esta fase é, na sua maioria, formada em reações secundárias e terciárias acima de  $700^\circ\text{C}$ . Na co-combustão de carvão com biomassa, o aparecimento desta fase cristalina é justificável pela temperatura de operação em leito fluidizado que gira em torno de  $850^\circ\text{C}$ .

Nas cinzas de combustão do carvão de Candiota utilizado neste trabalho deve-se ressaltar a presença de sulfito de cálcio ( $\text{CaSO}_3$ ), que não é uma substância comum presente nas cinzas de combustão de carvão. O aluminossilicato presente foi a muscovita  $\text{KAl}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ , que vem a ser uma substância importante quando se considera o uso da cinzas de carvão como um coproduto, por exemplo, na construção civil ou na síntese de zeólitas (CARDOSO et al., 2015).

De acordo com Dai et al., 2008, quando a co-combustão é realizada de forma direta, as cinzas de carvão e biomassa são misturadas na saída da zona de combustão especialmente para razões elevadas de biomassa na co-combustão, como as utilizadas neste trabalho. As opções para um uso posterior das cinzas devem ser estudadas devido às mudanças que podem ocorrer na composição das mesmas como as verificadas nos difratogramas de raios-X da Figura 35.



**Figura 34** - Difratomogramas de raios-X das cinzas de combustão do carvão e da co-combustão de carvão Candiota e RCAN, sendo: S ( $\text{SiO}_2$ ); H ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); C1 ( $\text{CaSO}_4$ ); C2 ( $\text{CaSO}_3$ ); C3 ( $\text{CaO}$ ); C4 ( $\text{CaCO}_3$ ); M ( $\text{KAl}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) e P ( $\text{MgO}$ ).



De acordo com Ghiggi et al. (2012), cinzas com altos teores de Ca, Fe e S tendem a apresentar temperaturas de fluidez e viscosidade mais baixa. Uma vez verificando-se a existência de fases cristalinas baseadas na presença de Ca à medida que RCAN é adicionado na mistura de co-combustão, deve-se analisar a influência de tal adição na fusibilidade das cinzas. Quando são estudadas as cinzas da co-combustão, é importante verificar as mudanças na temperatura de fusão, pois as cinzas podem ficar depositadas no leito, causando aglomeração das mesmas, ou mesmo na superfície dos trocadores de calor, prejudicando a transferência de calor em unidades de geração de energia (METTANANT et al., 2009).

Os resultados apresentados na Tabela 13 fazem referência às temperaturas de amolecimento, deformação e fusibilidade das cinzas das amostras de carvão e RCAN nas proporções de 70:30, 60:40 e 40:60, respectivamente. Verifica-se, nestes resultados, a influência na adição de biomassa na co-combustão quanto à diminuição das temperaturas de amolecimento, deformação e fusibilidade, devido a presença de metais alcalinos nas cinzas. No entanto, os valores para estas temperaturas situam-se bem acima dos valores usualmente empregados no leito fluidizado (entre 850 e 900°C).

**Tabela 13-** Sequência de temperaturas de amolecimento, deformação e fusão das cinzas do carvão, RCAN e suas misturas.

| Temperatura (°C) | Carvão | RCAN | Carvão:RCAN 70:30 | Carvão:RCAN 60:40 | Carvão:RCAN 40:60 |
|------------------|--------|------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Amolecimento     | 1409   | 1457 | 1206              | 1328              | 1301              |
| Deformação       | 1488   | 1470 | 1309              | 1409              | 1346              |
| Fusão            | 1618   | 1518 | 1538              | 1560              | 1470              |

Segundo Sahu et al. (2014), verificou-se que a taxa de deposição de cinzas da co-combustão de carvão com resíduos de madeira tendem a ser semelhantes às taxas de deposição da utilização unicamente de carvão. Isto ocorre, pois estes resíduos tendem a apresentar baixos teores de metais alcalinos, especialmente Na e K. No entanto, de acordo com o mesmo autor, a deposição das cinzas na co-combustão a temperaturas acima de 1250°C podem ser consideráveis.

Dessa forma, através da análise das cinzas pode-se perceber que a utilização de RCAN em maior proporção na co-combustão com carvão, altera a composição das cinzas obtidas, destacando-se a presença de óxido de cálcio (CaO), calcita (CaCO<sub>3</sub>) e ainda a muscovita (KAl<sub>2</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>). A presença destes compostos indica que é possível o uso das cinzas da co-combustão como um insumo para a utilização na construção civil, ou ainda, na síntese de materiais zeolíticos (CARDOSO et al., 2015).

## 6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho concluiu-se que as operações de co-combustão em planta piloto de leito fluidizado borbulhante foram realizadas com sucesso, onde foram testadas diferentes frações de alimentação entre a biomassa (Resíduo de Casca de Acácia Negra – RCAN) e carvão mineral da Mina de Candiota.

Considerando os resultados obtidos através da caracterização da biomassa RCAN, o teor de carbono elementar deste resíduo foi de 51,3% e de material volátil foi superior a 76% em massa, indicando que este tipo de biomassa pode ser utilizado para a geração de energia térmica. O RCAN também apresentou teor de enxofre de 0,1% em massa, bem abaixo dos 1,9% apresentados pelo carvão mineral. Ainda, a menor temperatura de ignição do RCAN, comparada ao carvão Candiota, fica evidente através da maior perda de massa observada entre as temperaturas de 110°C e 450°C conforme mostraram as análises das curvas de degradação térmica TGA.

Com relação as operações de co-combustão com biomassa, à estabilização da temperatura de operação do leito fluidizado da planta piloto, atingiram desempenhos similares de geração de calor no reator em comparação aos desempenhos com uso de carvão, onde foram utilizando quantidades que variaram de 38% a 73% de biomassa na composição de alimentação do reator. Ainda, as condições de operação com elevada porcentagem de biomassa necessitaram quantidades menores de excesso de ar quando comparado com a combustão do carvão mineral puro. Também verificou-se que a co-combustão do RCAN com carvão reduziu consideravelmente as concentrações do composto SO<sub>2</sub> nos gases gerados no processo.

Os resultados dos testes de fluidização no sistema de bancada mostraram que a adição de pequenas quantidades de biomassa tem influência sobre a fluidodinâmica do leito, e ainda, que velocidades mínimas de fluidização das misturas dos combustíveis ocorreram em valores mais elevados com o aumento da fração de biomassa no fluidizador.

A utilização de RCAN em maior proporção na co-combustão, altera a composição das cinzas obtidas, destacando-se a presença de óxido de cálcio (CaO), calcita (CaCO<sub>3</sub>) e óxido de magnésio (MgO). Além disto, observou-se a presença de quartzo (SiO<sub>2</sub>), hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), anidrita (CaSO<sub>4</sub>) e sulfito de cálcio (CaSO<sub>3</sub>) nas cinzas de todas as amostras analisadas. O aluminossilicato presente na cinza foi a muscovita KAl<sub>2</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>, que é uma substância importante quando se considera o uso da cinzas de carvão como um coproduto, por exemplo, na construção civil ou na síntese de zeólitas. O estudo das temperaturas de amolecimento, deformação e fusibilidade das cinzas na co-combustão mostrou a influência da adição de biomassa para a diminuição destas temperaturas. No entanto, as temperatura ainda situaram-se bem acima dos valores empregados nos testes em leito fluidizado e ou que pudessem influenciar na formação de compostos poluentes como o NO<sub>x</sub>.

Finalmente, a co-combustão de RCAN com carvão mineral de Candiota se mostrou viável para aplicação no processo de combustão em planta piloto de leito fluidizado borbulhante. Dessa forma, o presente trabalho avaliou o uso de um resíduo industrial no processo de co-combustão em leito fluidizado para fins de produção de energia. Os resultados obtidos mostraram que houve redução de poluentes nas emissões atmosféricas e redução do excesso de ar necessário ao processo, motivando futuros estudos teóricos e experimentais envolvendo a aplicação desta metodologia no desenvolvimento de tecnologias mais limpas.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos no processo de co-combustão de Resíduos de Cascas de Acácia Negra (RCAN) com carvão mineral em leito fluidizado, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros. Dessa forma, a fim de se obter novas informações que possam contribuir para a melhoria do processo, no sentido de diminuir as emissões de gases poluentes, aumentar a economia de energia utilizada no procedimento e a utilização de resíduos orgânicos como fonte de energia, e com base nos resultados obtidos, sugere-se:

- realizar estudos da co-combustão de diferentes biomassas e carvão para comparação com os dados obtidos no presente estudo;
- caracterizar e comparar as cinzas geradas durante as operações de co-combustão com as cinzas geradas na combustão dos combustíveis utilizados;
- realizar ensaios de combustão com 100% de biomassa RCAN na alimentação no sistema da planta piloto;
- realizar uma avaliação econômica da implantação do processo de co-combustão observando locais próximos aos locais de geração das biomassas;
- comparar os resultados da co-combustão de biomassa e carvão mineral entre os sistemas de leito fluidizado borbulhante e leito fluidizado circulante.

## REFERÊNCIAS

ABELHA, P.; Franco, C.; Pinto, F.; Lopes, H.; Gominho, J.; Lourenço, A.; Pereira, H. Thermal Conversion of *Cynara Cardunculus* L . and Mixtures with *Eucalyptus Globulus* by Fluidized Bed Combustion and Gasification. **Energy and Fuels**, v. 27, n. 11, p. 6725–6737, 2013.

ABELHA, P. M. R. D. J. Emissões Gasosas Durante a Co-Combustão de Carvão com Resíduos. **Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia**, p. 253, 2005.

ABREU, S. M. C. AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE LEITOS FLUIDIZADOS A PARTIR DA ANÁLISE DOS PEDIDOS DE PATENTES. p. 523–530, 2015.

AKPULAT, O.; VAROL, M.; ATIMTAY, A. T. Effect of freeboard extension on co-combustion of coal and olive cake in a fluidized bed combustor. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 15, p. 6177–6184, 2010.

AL-SHEMMERI, T. T.; YEDLA, R.; WARDLE, D. Thermal Characteristics of Various Biomass Fuels in a Small Scale Biomass Combustor. **Applied Thermal Engineering**, v. 85, p. 243–251, 2015.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <<<http://www.aneel.gov.br>>>. Acesso em: 8 jan. 2016.

ARAÚJO, D. DE S. S. Co-Combustão de Biomassa e Carvão em Leito Fluidizado: Impactes nas emissões atmosféricas de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, Dioxinas e Furanos e Material Particulado. **Disertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa Faculdade de Ciências e Tecnologia**, p. 141, 2008.

ARVELAKIS, S.; FRANSEN, F. J. Melting behavior of ashes from the co-combustion of coal and straw. **Energy and Fuels**, v. 21, n. 5, p. 3004–3009, 2007.

ATAKUL, H., ONER, G. YARDIM, M. F. FBC research in Turkey. **Energy Sources**, v. 15, p. 1–15, 1993.

BAGATINI, M. C.; KLUG, J. L.; HECK, N. C.; OSORIO, E.; VILELA, A. C. F.; DA CRUZ, R. Behaviour of coal ashes for pulverised coal injection at high temperatures

in relation to their chemical and mineralogical composition - experimental and computational analysis. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 36, n. 8, p. 583–589, 2009.

BASU, P. Combustion and gasification in fluidized beds”, 1<sup>o</sup> edition. **published by Taylor & Francis Group. New York**, 2006.

BORTOLIN, T. A.; TRENTIN, A. C.; PERESIN, D. Estimativa da geração de resíduos florestais no Brasil. **3<sup>o</sup> Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente**, 2012.

BRACHI, P.; CHIRONE, R.; MICCIO, F.; MICCIO, M.; PICARELLI, A.; RUOPPOLO, G. Fluidized bed co-gasification of biomass and polymeric wastes for a flexible end-use of the syngas: Focus on bio-methanol. **Fuel**, v. 128, p. 88–98, 2014.

BRASIL. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa). **Diário Oficial da União**, 2002.

BRASIL. Ministerio de Minas e Energia. Matriz Energética Nacional 2030. p. 254, 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Florestas do brasil - em resumo**, p. 152, 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia & Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional (BEN)**, p. 61, 2015.

BRASIL. **Ministério de Minas e Energia & Empresa de Pesquisa Energética**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/03/usinas-de-biomassa-fecham-2015-com-11-mil-mw-de-capacidade-instalada>>. Acesso em: 15 ago. 2016.

CARDOSO, A. M.; PAPROCKI, A.; FERRET, L. S.; AZEVEDO, C. M. N.; PIRES, M. Synthesis of zeolite Na-P1 under mild conditions using Brazilian coal fly ash and its application in wastewater treatment. **Fuel**, v. 139, p. 59–67, 2015.

CGTEE. **Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica - Eletrobras**. Disponível em: <<http://cgtee.gov.br/UNIDADES/CANDIOTA/#>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

CLARKE, K. L.; PUGSLEY, T.; HILL, G. A. Fluidization of moist sawdust in binary particle systems in a gas-solid fluidized bed. **Chemical Engineering Science**, v. 60, p. 6909–6918, 2005.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 436, de 13 de maio de 2011. 2011.

COUTO, C. M. Estimativa do poder calorífico de madeiras de acácia-negra e eucalipto do Município de Pelotas - RS. p. 56, 2014.

DAI, J.; SOKHANSANJ, S.; GRACE, J. R.; BI, X.; LIM, C. J.; MELIN, S. Overview and some issues related to co-firing biomass and coal. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 86, n. 3, p. 367–386, 2008.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 2, p. 219–230, 2004.

DEMIRBAS, A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 1, p. 14–34, 2009.

DNPM. **Departamento Nacional de Produção Mineral. Anuário Mineral Brasileiro 2010**. Disponível em: <[www.dnpm.gov.br](http://www.dnpm.gov.br)>. Acesso em: 2 fev. 2016.

DUMORTIER, J. Co-firing in coal power plants and its impact on biomass feedstock availability. **Energy Policy**, v. 60, p. 396–405, 2013.

EDREIS, E. M. A.; GUO, G.; LI, A.; CHAO, C.; HU, H.; ZHANG, S.; GUI, B.; XIAO, L.; XU, K.; ZHANG, P.; YAO, H. CO<sub>2</sub> co-gasification of lower sulphur petroleum coke and sugar cane bagasse via TG-FTIR analysis technique. **Bioresource Technology**, v. 136, p. 595–603, 2013.

EMATER/RS. **Silvicultura**. Disponível em: <<http://www.emater.tche.br/site/area-tecnica/sistema-de-producao-vegetal/silvicultura.php#.V-FsjPkrLIU>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

FAÉ GOMES, G. M.; VILELA, A. C. F.; ZEN, L. D.; OSÓRIO, E. Aspects for a cleaner production approach for coal and biomass use as a decentralized energy source in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 47, p. 85–95, 2013.



- FAN, L.-S.; ZHU, C. Principles of Gas-Solid Flows. **Cambridge University Press**, 1998.
- FENG, S.; CHENG, S.; YUAN, Z.; LEITCH, M.; XU, C. Valorization of bark for chemicals and materials: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 560–578, 2013.
- GAUTHIER, D.; ZERGUERRAS, S.; FLAMANT, G. Influence of the particle size distribution of powders on the velocities of minimum and complete fluidization. **Chemical Engineering Journal**, v. 74, p. 181–196, 1999.
- GELDART, D. Types of Gas Fluidization. **Powder Technology**, v. 7, p. 285–292, 1973.
- GELDART, D. Gas Fluidization Technology. **John Wiley & Sons, New York**, 1986.
- GHIGGI, M. L. F.; VILELA, A. C. F. Estudo de fusibilidade de cinzas de misturas de carvão e sua relação com a composição química e mineralógica. **III Congresso Brasileiro de Carvão**, v. Anais, n. 2002, p. 1–13, 2009.
- GOGEBAKAN, Z.; GOGEBAKAN, Y.; SELÇUK, N.; SELÇUK, E. Investigation of ash deposition in a pilot-scale fluidized bed combustor co-firing biomass with lignite. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 2, p. 1033–1036, 2009.
- GOLDFARB, J. L.; CEYLAN, S. Second-generation sustainability: Application of the distributed activation energy model to the pyrolysis of locally sourced biomass–coal blends for use in co-firing scenarios. **Fuel**, v. 160, p. 297–308, 2015.
- GOMES, G. M. F. ESTUDO DOS ASPECTOS DE PROCESSO ENVOLVIDOS NA TRANSIÇÃO DA COMBUSTÃO COM AR ATMOSFÉRICO PARA OXICOMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE. **Tese de Doutorado**, p. 194, 2013.
- GRACE J.R., AVIDAN A.A., K. T. M. Circulating Fluidized Beds. **Blackie Academic & Professional**, 1997.
- GREWAL, W. S.; SAXENA, G. S. Comparison of commonly used relations for minimum fluidization velocity of small solid particles. **Powder Technology**, v. 26, p. 229–238, 1980.

HIMMELBLAU, D. M.; RIGGS, J. B. **Basis Principles and Calculations in Chemical Engineering**. 8. ed. [s.l.] Pearson Education, Inc., 2012.

HUPA, M. Interaction of fuels in co-firing in FBC. **Fuel**, v. 84, n. 10, p. 1312–1319, 2005.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção agrícola por regiões**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2014/08/ibge.png/view>>. Acesso em: 15 jan. 2016.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/silvi/default.asp?t=2&z=t&o=29&u1=1&u2=1&u3=6&u4=1>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

IDEIAS, P. M. C. Influência da matéria volátil na combustão de biomassa em leito fluidizado. **Universidade de Aveiro**, p. 111, 2008.

JENKINS, B.; BAXTER, L.L.; MILES, T.R.; MILES, T.R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, n. 1-3, p. 17–46, 1998.

KHAN, A. A.; DE JONG, W.; JANSENS, P. J.; SPLIETHOFF, H. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. **Fuel Processing Technology**, v. 90, n. 1, p. 21–50, 2009.

KUMAR, H.; MOHAPATRA, S. K.; SINGH, R. I. Study of a 30 MW bubbling fluidized bed combustor based on co-firing biomass and coal. **Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences**, v. 40, n. 4, p. 1283–1299, 2015.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering - 2nd ed.** [s.l.: s.n.].

KUPRIANOV, V. I.; JANVIJITSAKUL, K.; PERMCHART, W. Co-firing of sugar cane bagasse with rice husk in a conical fluidized-bed combustor. **Fuel**, v. 85, n. 4, p. 434–442, 2006.

KUPRIANOV, V. I.; KAEWKLUM, R.; CHAKRITTHAKUL, S. Effects of operating conditions and fuel properties on emission performance and combustion efficiency of a swirling fluidized-bed combustor fired with a biomass fuel. **Energy**, v. 36, n. 4, p. 2038–2048, 2011.

- LAGEMANN, V. Combustão em Caldeiras Industriais - Óleo & Gás Combustível. p. 282, 2016.
- LIN, C. L.; WEY, M. Y.; YOU, S. . The effect of particle size distribution on minimum fluidization velocity at high temperature. **Powder Technology**, v. 126, p. 297–301, 2002.
- LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, MA. A. R. Geração Termelétrica Planejamento, Projeto e Operação. Volume 1. p. 1296, 2004.
- MADHIYANON, T.; SATHITRUANGSAK, P.; SOPONRONNARIT, S. Influences of coal size and coal-feeding location in co-firing with rice husks on performance of a short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC). **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 3, p. 462–470, 2011.
- MAGDZIARZ, A.; WILK, M. Thermal characteristics of the combustion process of biomass and sewage sludge. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 114, n. 2, p. 519–529, 2013.
- MARTINS, Â. P. G. Conversão termoquímica de diferentes biomassas em leito fluidizado. 2012.
- MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. Unit operations of chemical engineering. 5th ed. **McGraw-Hill**, 1993.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 47–54, 2002.
- METTANANT, V.; BASU, P.; BUTLER, J. Agglomeration of biomass fired fluidized bed gasifier and combustor. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 87, n. 5, p. 656–684, 2009.
- MILES, T. R.; BAXTER, L. L.; BRYERS, R. W.; JENKINS, B. M.; ODEN, L. L. Alkali deposits found in biomass power plants, Vol 1. **NREL report**, v. I, p. 1–122, 1995.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics - 5th Edition**. [s.l: s.n.].

- MOTTA, E. P. Queda de pressão em um leito de partículas de xisto: Avaliação de modelos para distribuição granulométrica e diâmetros médios equivalentes, estudo do efeito da altura do leito e avaliação de modelos para predição da queda de pressão. **Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2009.**
- NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO, J. P. S. Biomass waste co-firing with coal applied to the Sines Thermal Power Plant in Portugal. **Fuel**, v. 132, p. 153–157, 2014.
- OKA, S. N. Fluidized Bed Combustion. **Marcel Dekker, Inc., New York**, p. 580, 2004.
- OSAKI, F.; DAROLT, M. R. Estudo da qualidade de cinzas vegetais para uso como adubos na região metropolitana de Curitiba. **Revista Setor Ciências Agrárias**, v. 2, 1991.
- PÉCORA, A. A. B.; ÁVILA, I.; LIRA, C. S.; CRUZ, G.; CRNKOVIC, P. M. Prediction of the combustion process in fluidized bed based on physical-chemical properties of biomass particles and their hydrodynamic behaviors. **Fuel Processing Technology**, v. 124, p. 188–197, 2014.
- PERES, R. S.; ARMELIN, E.; ALEMÁN, C.; FERREIRA, C. A. Modified tannin extracted from black wattle tree as an environmentally friendly antifouling pigment. **Industrial Crops and Products**, v. 65, p. 506–514, 2015.
- PINHEIRO, P. C. DA C.; VALLE, R. M. Controle de combustão: otimização do excesso de ar. **II Congresso de equipamentos e automação da indústria química e petroquímica**, n. 2, p. 157–162, 1995.
- PIRES, M.; QUEROL, X.; TEIXEIRA, E. C. Caracterização do carvão de candiota e suas cinzas. **Geochimica Brasiliensis**, v. 15, p. 113–130, 2001.
- RADOVANOVIC, M. Fluidized Bed Combustion. **Hemisphere Publishing Corporation**, p. 186, 1986.

- REICHEL, D.; KLINGER, M.; KRZACK, S.; MEYER, B. Effect of ash components on devolatilization behavior of coal in comparison with biomass - Product yields, composition, and heating values. **Fuel**, v. 114, p. 64–70, 2013.
- RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M.; MENDONÇA, A. C. A. B.; CRUZ, D. O. A.; GUERRA, D. R. S.; MACÊDO, E. N.; ICHIHARA, J. A. **Combustão e gaseificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia**. 1ª Edição ed. [s.l.] Ministério de Minas e Energia, 2008.
- RIBEIRO, A. P. R. A. Influência da Qualidade do Carvão e das Condições Operacionais no Processo de Combustão de uma Usina Termelétrica. **Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis**, 2002.
- RUHUL KABIR, M.; KUMAR, A. Comparison of the energy and environmental performances of nine biomass/coal co-firing pathways. **Bioresource Technology**, v. 124, p. 394–405, 2012.
- SAHU, S. G.; CHAKRABORTY, N.; SARKAR, P. Coal-biomass co-combustion: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 575–586, 2014.
- SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E. A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M. S.; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2262–2289, 2011.
- SAMI, M.; ANNAMALAI, K.; WOOLDRIDGE, M. Co-firing of coal and biomass fuel blends. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 27, n. 2, p. 171–214, 2001.
- SCALA, F.; CHIRONE, R. Fluidized bed combustion of alternative solid fuels. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 28, p. 691–699, 2004.
- SILVA, J. B. DA. Hidrinâmica da fluidização de biomassa e inertes em leito fluidizado. p. 91, 2011.
- SMIT, H. C.; MEINCKEN, M. Time/temperature combustion profiles of various wood-based biofuels. **Biomass and Bioenergy**, v. 39, p. 317–323, 2012.
- SMOLINSKI, A.; HOWANIEC, N.; STANCZYK, K. A comparative experimental study

of biomass, lignite and hard coal steam gasification. **Renewable Energy**, v. 36, n. 6, p. 1836–1842, 2011.

STREIBEL, T.; MUHLBERGER, F.; GEIBLER, R.; SARAJI-BOZORGZAD, M.; ADAM, T.; ZIMMERMANN, R. Influence of sulphur addition on emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons during biomass combustion. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 35, n. 2, p. 1771–1777, 2015.

SUBRAMANI, H. J.; BALAIYYA, M. B. M.; MIRANDA, L. R. Minimum fluidization velocity at elevated temperatures for Geldart's group-B powders. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 32, p. 166–173, 2007.

SUKSANKRAISORN, K.; PATUMSAWAD, S.; FUNGTAMMASAN, B. Co-firing of Thai lignite and municipal solid waste (MSW) in a fluidised bed: Effect of MSW moisture content. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 17-18, p. 2693–2697, 2010.

TOKARSKI, S.; GŁÓD, K.; ŚCIAŻKO, M.; ZUWAŁA, J. Comparative assessment of the energy effects of biomass combustion and co-firing in selected technologies. **Energy**, 2015.

VAN LOO, S.; KOPPEJAN, J. *The Handbook of Biomass Combustion & Co-firing*. Earthscan, London, UK, 2008.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; VASSILEVA, C. G. An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types. **Fuel**, v. 117, p. 152–183, 2013.

VASSILEV, S. V.; VASSILEVA, C. G.; VASSILEV, V. S. Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview. **Fuel**, v. 158, p. 330–350, 2015.

VIEIRA, A. C. Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas. p. 72, 2012.

---

WU, C. H.; CHANG, C. Y.; TSENG, C. H.; LIN, J. P. Pyrolysis product distribution of waste newspaper in MSW. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 67, n. 1, p. 41–53, 2003.