

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**CO-COMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO DE CARVÃO MINERAL COM
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CASCA DE NABO FORRAGEIRO:
AVALIAÇÃO FLUIDODINÂMICA E DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS**

JONATAN VUELMA

Dissertação de Mestrado

São Leopoldo

2017

**CO-COMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO DE CARVÃO MINERAL COM
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CASCA DE NABO FORRAGEIRO:
AVALIAÇÃO FLUIDODINÂMICA E DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS**

Jonatan Vuelma

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Mestrado em Engenharia Mecânica

Orientador: Dr Flávia Schwarz Franceschini Zinani

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Roberto Wander (UNISINOS)
Prof. Dra. Maria Luiza Sperb Indrusiak (UFRGS)
Prof. Dr. Guilherme Souza (CIENTEC)

V986c

Vuelma, Jonatan.

Co-combustão em leito fluidizado de carvão mineral com bagaço de cana-de-açúcar e casca de nabo forrageiro: avaliação fluidodinâmica e das emissões atmosféricas / Jonatan Vuelma. – 2017.

44 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São Leopoldo, 2017.

“Orientadora: Dr. Flávia Schwarz Franceschini Zinani.”

1. Fluidização. 2. Combustíveis fósseis. 3. Biomassa. I. Título.

CDU 621

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Bruna Sant’Anna – CRB 10/2360)

Jonatan Vuelma

**CO-COMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO DE CARVÃO MINERAL COM
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CASCA DE NABO FORRAGEIRO:
AVALIAÇÃO FLUIDODINÂMICA E DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS**

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica
Área de concentração: Energia

Aprovado em ____ de _____ 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. (a) Dr. (a).

Prof. (a) Dr. (a).

Prof. (a) Dr. (a).

Dedico este trabalho a todas as pessoas que convivem e acreditam em mim

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao CNPq pela bolsa oferecida através do Edital MCTI/CNPq N° 75/2013; ao PPGEM da Unisinos pela oportunidade de realizar esse trabalho, principalmente, a Professora orientadora Dra Flávia Zinani; a Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul – CIENTEC, pela oportunidade de desenvolver parte do trabalho em seus laboratórios. Um agradecimento especial ao Dr. Guilherme de Souza, que me orientou no desenvolvimento do trabalho nos laboratórios CIENTEC; ao Grupo de Pesquisa Centro de Estudos em Biorrefinaria (CESBIO) da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, pelo apoio na realização do trabalho; ao professor Dr. Rodolfo Rodrigues da UNIPAMPA, por todo apoio dado na primeira parte do trabalho, que mesmo não dando certo, me ajudou demais; ao professor Fernando Santos, que além de professor é amigo, agradeço pelo apoio e pelo incentivo dado a todo momento; ao Guilherme Sperling Trapp por “segurar as pontas” nos momentos que precisei ficar ausente do trabalho; a todos os amigos e familiares que tenho um apreço imenso; um agradecimento mais que especial para toda minha família por todo incentivo: Pai, Mãe, Xandi, Gui, Cris e Luisa, podem ter certeza que vão contar sempre comigo; por fim, um agradecimento especial a minha namorada Tássia, quem sabe, futura esposa, Te Amo.

Se não puder fazer tudo, faça tudo que puder.

RESUMO

A geração de energia elétrica atualmente é fortemente dependente de combustíveis fósseis, os quais acabam por emitir grandes quantidades de gases responsáveis pelo efeito estufa (*greenhouse gases – GHG*) como CO₂, CO, NO_x e SO₂. Uma das alternativas para reduzir a emissão desses gases e inserir recursos renováveis na matriz energética, é a utilização de biomassas como substitutas ou associadas aos combustíveis fósseis, como o carvão mineral. Em alguns países, a tecnologia do leito fluidizado vem sendo utilizada para associar biomassas com o carvão mineral na geração de energia térmica. Entretanto, uma etapa anterior à sua implementação em escala industrial consiste na avaliação do comportamento fluidodinâmico e do impacto das biomassas nas emissões atmosféricas no processo de co-combustão com o carvão mineral. Neste trabalho, foi avaliada a velocidade mínima de fluidização de misturas de carvão mineral e biomassas em três reatores de leito fluidizado com escalas e geometrias distintas. Foram utilizadas misturas de carvão mineral da mina de Candiota, no Rio Grande do Sul, com duas biomassas regionais distintas: bagaço de cana-de-açúcar e cascas de nabo forrageiro, em proporções de 10%, 30% e 50% em volume. As biomassas também foram caracterizadas por diferentes técnicas que incluíram análises do poder calorífico, imediata e elementar, sendo possível observar valores de poder calorífico semelhantes entre as biomassas 20.150 kJ/kg e 17.100 kJ/kg e os teores de cinzas foram de 4,88% e 3,56% para o bagaço de cana-de-açúcar e da casca de nabo forrageiro, respectivamente, que são consideradas relativamente baixos. Para avaliar o impacto da combustão de biomassas nas emissões atmosféricas, foram realizados ensaios de combustão em uma unidade de bancada com monitoramento contínuo da emissão de NO_x e SO₂. Foi verificado que a liberação de SO₂ é elevada na combustão do carvão (164 ppm), sendo possível obter quantidades inferiores na combustão da casca do nabo forrageiro (23 ppm) e, principalmente, com o bagaço de cana (3 ppm). Os resultados mostraram-se promissores para avaliação em escala piloto do processo, para fins de avaliar técnica e economicamente o processo de co-combustão destes resíduos de biomassa em unidade industrial.

Palavras-chave: *Emissões atmosféricas, fluidização, co-queima, energias renováveis.*

ABSTRACT

Currently, the electricity generation is heavily dependent on fossil fuels, which emit large amounts of greenhouse gases (GHG) such as CO₂, CO, NO_x and SO₂. One of the alternatives to reduce the emission of these gases and to insert renewable resources in the energy matrix is the use of biomass as substitute or associated with fossil fuels, like coal. In some countries, the fluidized bed technology has been used to associate biomass with coal in the generation of thermal energy. However, a step prior to its implementation on an industrial scale consists on the evaluation of the fluid dynamics behavior and the impact of the biomass on the atmospheric emissions in the process of co-combustion with coal. In this work, the minimum fluidization velocity of mineral coal and biomass mixtures was evaluated in three fluidized bed reactors with different scales and geometries. Mixtures of coal from the Candiota mine in Rio Grande do Sul were used, with two distinct regional biomasses: sugarcane bagasse and *Raphanus Sativus L.* husks, in proportions of 10%, 30% and 50% of volume. The biomasses were also characterized by different techniques that included heat value, immediate and elementary analysis, being possible to observe similar values of heat value between the biomasses 20,150 kJ / kg and 17,100 kJ / kg and the ash contents were of 4.88% and 3.56% for sugarcane bagasse and *Raphanus Sativus L.* husks, respectively, ash values are considered relatively low. To evaluate the impact of biomass combustion on atmospheric emissions, combustion tests were carried out on a bench unit with continuous NO_x and SO₂ emission monitoring. It was verified that the release of SO₂ is high in the combustion of coal (164 ppm). It is possible to obtain lower amounts in the combustion of the *Raphanus Sativus L.* husks (23 ppm) and, mainly, with the cane bagasse (3 ppm). The results were promising for pilot-scale evaluation of the process, in order to technically and economically evaluate the process of co-combustion of these biomass residues in an industrial unit.

Keywords: *Atmospheric emissions, fluidization, co-firing, renewable energies.*

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proporção e massa de cada amostra no reator 1.....	23
Tabela 2 – Proporção e massa de cada amostra no reator 2.....	23
Tabela 3 – Proporção e massa de cada amostra no reator 3.....	24
Tabela 4 – Propriedades físicas das partículas.....	26
Tabela 5 – Análise elementar do carvão, da casca do nabo forrageiro e do bagaço de cana-de-açúcar em base seca.....	27
Tabela 6 - Análise imediata do carvão, da casca do nabo forrageiro e do bagaço de cana-de-açúcar.....	28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de fluidização de bancada reator 1 e reator 2	21
Figura 2 – Esquema da bancada de fluidização – reator 3.....	22
Figura 3 – Determinação da velocidade de mínima fluidização.....	25
Figura 4 – Determinação da velocidade de mínima fluidização.....	25
Figura 5 – Foto de unidade de bancada em que foi realizada a combustão	26
Figura 6 – Mistura de 10%, 30% e 50% de casca de nabo forrageiro com carvão mineral no reator 1	28
Figura 7 – Mistura de 10%, 30% e 50% de bagaço de cana com carvão mineral no reator 1.....	30
Figura 8 – Mistura de 10%, 30% e 50% de nabo forrageiro com carvão mineral no reator 2.....	31
Figura 9 – Mistura de 10% de casca de nabo forrageiro com carvão mineral no reator 3.....	32
Figura 10 – Mistura de 30% de casca de nabo forrageiro com carvão mineral no reator 3.....	32
Figura 11 – Mistura de 50% de casca de nabo forrageiro com carvão mineral no reator 3.....	32
Figura 12 – Emissões de SO ₂ com a variação de temperatura para carvão, casca de nabo forrageiro e bagaço de cana-de-açúcar.....	35
Figura 13 - Emissões de NO _x com a variação de temperatura para carvão, nabo forrageiro e bagaço de cana	37

LISTA DE SÍMBOLOS

Nomenclatura

F_m	Média de três fluidizações
D	Diâmetro [mm]
H	Altura [mm]
PCS	Poder Calorífico Superior [kJ/kg]
T_c	Teor de cinzas [%]
T_{cf}	Teor de carbono fixo [%]
T_u	Teor de umidade [%]
T_v	Teor de voláteis [%]
U_s	Velocidade do ar injetado no leito [m/s]
U_{mf}	Velocidade mínima de fluidização
U_{fi}	Velocidades de fluidização incipiente
U_{fc}	Velocidade de fluidização completa
ΔP	Variação de Pressão [XX]

LISTA DE ABREVIATURAS

CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul
LCVMAT	Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 ARTIGO CIENTÍFICO	14
2.1 Resumo	14
2.2 Introdução	15
2.3 Metodologia.....	17
2.3.1 Preparo das Amostras	17
2.3.2 Caracterização das amostras	17
2.3.3 Ensaio de Fluidização	19
2.3.4 Ensaio de Combustão na Unidade de Bancada.....	25
2.4 Resultados e Discussão.....	25
2.4.1 Potencial energético das biomassas Utilizadas.....	25
2.4.2 Velocidades de Fluidização	28
2.4.3 Emissões Geradas na Combustão de Carvão e Biomassa	34
2.5 Conclusões.....	38
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1 INTRODUÇÃO

Nesse trabalho foi realizada avaliação fluidodinâmica em três diferentes unidades de bancada de leito fluidizado. Utilizou-se para a fluidização, mistura em diferentes proporções de carvão mineral com casca de nabo forrageiro e bagaço de cana-de-açúcar. A avaliação fluidodinâmica foi realizada com três proporções diferentes de biomassa; 10%, 30% e 50% em volume. Além da análise fluidodinâmica, foram realizadas em uma bancada de leito fixo, a combustão desses combustíveis avaliando-se a emissão dos gases SO_2 e NO_x . A avaliação dos Gases foi realizada fazendo a combustão do carvão mineral, do bagaço de cana-de-açúcar e da casca do nabo forrageiro separadamente.

Foram realizadas as seguintes fluidizações:

- ✓ Fluidização de 10% de casca de nabo forrageiro com 90% de carvão, em três reatores diferentes;
- ✓ Fluidização de 30% de casca de nabo forrageiro com 70% de carvão, em três reatores diferentes;
- ✓ Fluidização de 50% de casca de nabo forrageiro com 50% de carvão em três reatores diferentes;
- ✓ Fluidização de 10% de bagaço de cana-de-açúcar com 90% de carvão, em três reatores diferentes;
- ✓ Fluidização de 30% de bagaço de cana-de-açúcar com 70% de carvão, em três reatores diferentes;
- ✓ Fluidização de 50% de bagaço de cana-de-açúcar com 50% de carvão, em três reatores diferentes;
- ✓ Combustão de carvão mineral puro para avaliação dos gases SO_2 e NO_x ;
- ✓ Combustão de casca de nabo forrageiro puro para avaliação dos gases SO_2 e NO_x ;
- ✓ Combustão de bagaço de cana-de-açúcar puro para avaliação dos gases SO_2 e NO_x ;

Com essas avaliações realizadas, verificar-se que, a combustão dessas biomassas associadas ao carvão mineral tem um bom potencial energético, reduzindo as emissões dos gases avaliados.

No capítulo 2, são apresentados a metodologia utilizada, os resultados obtidos e as principais conclusões em forma de artigo.

2 ARTIGO CIENTÍFICO

2.1 RESUMO

A geração de energia elétrica atualmente é fortemente dependente de combustíveis fósseis, os quais acabam por emitir grandes quantidades de gases responsáveis pelo efeito estufa (*greenhouse gases – GHG*) como CO₂, CO, NO_x e SO₂. Uma das alternativas para reduzir a emissão desses gases e inserir recursos renováveis na matriz energética, e a utilização de biomassas como substitutas ou associadas aos combustíveis fósseis, como o carvão mineral. Em alguns países, a tecnologia do leito fluidizado vem sendo utilizada para associar biomassas com o carvão mineral na geração de energia térmica. Entretanto, uma etapa anterior à sua implementação em escala industrial consiste na avaliação do comportamento fluidodinâmico e do impacto das biomassas nas emissões atmosféricas no processo de co-combustão com o carvão mineral. Neste trabalho, foi avaliada a velocidade mínima de fluidização de misturas de carvão mineral e biomassas em três reatores de leito fluidizado com escalas e geometrias distintas. Foram utilizadas misturas de carvão mineral da mina de Candiota, no Rio Grande do Sul, com duas biomassas regionais distintas: bagaço de cana-de-açúcar e cascas de nabo forrageiro, em proporções de 10%, 30% e 50% de volume. As biomassas também foram caracterizadas por diferentes técnicas que incluíram análises do poder calorífico, imediata e elementar, sendo possível observar valores de poder calorífico semelhantes entre as biomassas 20.150 kJ/kg e 17.100 kJ/kg e os teores de cinzas foram de 4,88% e 3,56% para o bagaço de cana-de-açúcar e da casca de nabo forrageiro, respectivamente, os valores das cinzas são consideradas relativamente baixos. Para avaliar o impacto da combustão de biomassas nas emissões atmosféricas, foram realizados ensaios de combustão em uma unidade de bancada com monitoramento contínuo da emissão de NO_x e SO₂. Foi verificado que a liberação de SO₂ é elevada na combustão do carvão (164 ppm), sendo possível obter quantidades inferiores na combustão da casca do nabo forrageiro (23 ppm) e, principalmente, com o bagaço de cana (3 ppm). Os resultados mostraram-se promissores para avaliação em escala piloto do processo, para fins de avaliar técnica e economicamente o processo de co-combustão destes resíduos de biomassa em unidade industrial.

Palavras-chave: *Emissões atmosféricas, fluidização, co-queima, energias renováveis.*

2.2 INTRODUÇÃO

O uso de fontes de energia renováveis para utilização em conjunto com os combustíveis fósseis, os quais predominam na atual matriz energética, é continuamente discutido em face às novas políticas de reduções de gases causadores do efeito estufa. Uma das alternativas disponíveis para essa redução é a utilização da biomassa como combustível alternativo nos processos de combustão. No Brasil, os resíduos agrícolas e industriais já desempenham um papel importante na matriz energética (BEB, 2014). Dentre as diferentes fontes de biomassa, a cana-de-açúcar e o nabo forrageiro vêm se destacando pelo seu potencial produtivo, químico e energético.

O nabo forrageiro é uma oleaginosa pertence à família das brassicaceas, sendo empregado na adubação verde e na rotação de culturas nas regiões sul, sudeste e centro-oeste do Brasil. A estimativa de sua produção é de aproximadamente 3000 kg/hm² de biomassa verde (CRUSCIOL et al., (2005); FURLANI (2000); CALEGARI (2001). Possui crescimento rápido, sendo que, em apenas 60 dias de germinação, já proporciona cobertura de 70% do solo, e seu ciclo de produção varia entre 150 e 180 dias (THEISEN, 2008; CALLEGARI, 1998). Faria (2016), estudou a utilização do nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) para a produção de biodiesel a partir das sementes, mas além da delas, grande quantidade de biomassa das palhas da planta e das cascas das sementes é deixada na própria lavoura. Essa palha possui uma quantidade de energia disponível bastante grande e que, pode ser usada para a geração de energia térmica, a partir da combustão.

A cana-de-açúcar, *Saccharum spp.*, é uma planta pertencente à família Poaceae e à classe monocotiledônea. As principais características dessa família são a inflorescência em forma de espiga, o crescimento do caule em colmos, as folhas com lâminas de sílica em suas bordas e a bainha aberta (SANTOS, 2013). O bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo fibroso gerado durante o esmagamento da cana para obtenção do caldo, que é utilizado para produção de açúcar e etanol (SAELEE et al., 2016). Aproximadamente 140 quilogramas de bagaço em base seca são gerados a cada tonelada de cana-de-açúcar processada (SANTOS et al., 2014). A área colhida de cana-de-açúcar destinada à atividade sucroenergética na safra 2015/16 foi de 8.654,2 mil hectares (CONAB, 2016). Aproximadamente 17% da oferta interna de energia do Brasil é associada ao etanol e bagaço da cana-de-açúcar, o que permite observar a abundância de bagaço gerado no país.

Uma das tecnologias promissoras para utilização da biomassa como combustível em processos de conversão termelétrica é a tecnologia de leito fluidizado, em que as

biomassas podem substituir parcial ou totalmente o carvão mineral no processo da combustão. O desenvolvimento dessa tecnologia permitiu alcançar níveis de eficiência bastante elevados de combustão, influenciando a redução das emissões e aumentando a flexibilidade dos combustíveis utilizados (PEÑA, 2011). Além disso, o leito fluidizado permite a utilização de combustíveis com propriedades físicas e físico-químicas variadas, com tamanhos variados e elevado teor de cinzas e umidade. O leito fluidizado possui alta taxa de transferência de calor, trabalha com temperaturas uniformes e controláveis além da possibilidade de utilização heterogênea de combustíveis (BASU, 2010).

As plantas de leito fluidizado são muito versáteis, podendo operar com variadas composições de combustíveis, incluindo misturas de diferentes proporções de carvão mineral e biomassa, tais como resíduos agrícolas e industriais ou ainda os resíduos sólidos urbanos (GUNGOR, 2008). O leito fluidizado apresenta a vantagem de emitir menos NO_x (óxidos de nitrogênio), por trabalhar a temperaturas menos elevadas. Conforme a proporção de biomassa utilizada, contribuem também na redução de CO_2 (dióxido de carbono).

A utilização do carvão continua sendo interessante, pois o Brasil possui vastas reservas de carvão mineral (14^a maior reserva no mundo) pouco exploradas. Considerando o atual consumo no Brasil, as reservas provadas são suficientes para prover carvão por mais de 500 anos (ROADMAP, 2012). As maiores reservas de carvão mineral encontram-se no estado do Rio Grande do Sul. O carvão gaúcho apresenta características como elevado teor de cinzas e de enxofre (FAÉ GOMES et al., 2015), o que torna a sua exploração via combustão mais crítica em termos de geração de resíduos sólidos e emissões de SO_2 .

No uso da biomassa, verifica-se um efeito sinérgico durante a co-combustão associado ao alto teor de material volátil da biomassa. Esta característica fornece uma chama mais estável para a mistura do combustível no reator (VASSILEV et al., 2013). Para a utilização desses combustíveis em um leito fluidizado, é necessário entender a dinâmica de fluidização das diferentes proporções de misturas (biomassa e carvão) para um maior desempenho nos processos de combustão.

A fluidização de misturas não é uma operação simples quando a mistura é constituída por partículas irregulares e de densidades diferente. No caso da biomassa suas características são muito diferentes, tornando a fluidização imprevisível (CUI et al, 2007).

CUNNI et al. (1991) diz que o modelo clássico de fluidização com partículas esféricas é inadequado para materiais irregulares como a biomassa.

Diferentes trabalhos de avaliação fluidodinâmica são encontrados na literatura. OLIVEIRA et al, (2013) estudou a velocidade mínima de fluidização de misturas com areia e diferentes biomassas. Os autores identificaram que partículas mais irregulares (bagaço de sorgo doce) fizeram com que a velocidade mínima de fluidização diminua com o aumento da biomassa, inversamente ao ocorrido com biomassas com partículas mais regulares (casca de soja e resíduos de tabaco). ZHANG et al, (2009) estudou o efeito da segregação das partículas de biomassas em um leito fluidizado. RAO et al (2001) avaliou a velocidade mínima de fluidização das misturas de material inerte e biomassa. CLARKE et al, (2005) avaliou a influência que a umidade da biomassa gera na velocidade mínima de fluidização.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi caracterizar as biomassas e verificar a velocidade mínima de fluidização em três diferentes reatores, utilizando uma mistura binária de diferentes proporções de carvão mineral com casca de nabo forrageiro e bagaço de cana-de-açúcar. Além da fluidização das misturas contendo essas biomassas, foi realizado uma avaliação preliminar das emissões de gases SO_2 e NO_x pela combustão em unidade de bancada com monitoramento contínuo dos gases.

2.3 METODOLOGIA

2.3.1. Preparo das Amostras

As biomassas lignocelulósicas utilizadas em todos os experimentos foram, a casca do nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) e o bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). As amostras de casca de nabo forrageiro foram obtidas no município de Três Passos/RS e as amostras de cana-de-açúcar no município de Ivoti/RS. As biomassas estudadas foram secas em estufa por 8 horas a 105 °C em constante homogeneização. Após a secagem, as amostras de casca de nabo forrageiro foram moídas em um moinho de facas no modelo SEIBT MGHS 270^a que ficou com um tamanho aproximado de 0,42 mm. Já o bagaço de cana-de-açúcar foi mantido o tamanho da partícula obtida da própria indústria, aproximadamente 0,84 mm.

O carvão mineral utilizado foi fornecido pela Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul – CIENTEC, sendo proveniente da mina de Candiota/RS. Esse carvão já possuía toda a caracterização e o tamanho da partícula, também já havia

sido dimensionado. De acordo com Aguiar (2016), esse material foi moído no moinho de facas (marca Marconi, modelo MA 340) com abertura das peneiras entre 10 e 32 mesh.

2.3.2. Caracterização das Amostras

O carvão mineral utilizado na combustão foi o mesmo que o utilizado nos ensaios de fluidização. A caracterização desse carvão foi fornecida pela CIENTEC. Para a casca do nabo forrageiro e o bagaço de cana-de-açúcar foram realizadas as seguintes análises: massa específica real e aparente, granulometria, análise imediata, análise elementar e poder calorífico. As metodologias utilizadas para a caracterização dessas biomassas são descritas a seguir.

Massa específica Aparente

Para medição da massa específica aparente do material, mediu-se a massa de material necessária para preencher um Becker de 500 ml. A razão obtida entre a massa do material e o seu volume aparente determinou a massa específica aparente do material.

Massa específica real

A determinação da massa específica das amostras foi realizada conforme a norma NP EM 1097-6, a picnometria com água. Devido à baixa densidade das partículas de biomassa, não foi possível, através deste teste, obter os valores de massa específica real. Devido a impossibilidade de determinação da massa específica real da biomassa via picnometria com água, alterou-se então a análise para picnometria a gás hélio. O picnômetro utilizado foi da marca Micromeritics, modelo AccuPcy II 13 do LCVMAT. Na análise citada, uma quantidade conhecida de amostra foi inserida em um compartimento, sendo este então, pressurizado com gás hélio. Espera-se então a estabilização de pressão neste compartimento. Após isso, o gás foi então liberado ao segundo compartimento, de volume conhecido, aferindo-se então, a pressão no segundo compartimento. A massa específica do material analisado no primeiro compartimento foi calculada levando-se em consideração a variação de pressão aferida nos dois compartimentos, ao volume do gás (considerando que os dois compartimentos estão calibrados para comportar o mesmo volume de gás) e a massa da amostra. O fluido utilizado como agente de fluidização foi o ar o qual, possui massa específica de 1,21 kg/m³, para uma temperatura de 20 °C a pressão de 1 atm.

Análise Imediata

Na análise imediata são quantificados os valores de: teor de umidade; teor de cinzas; teor de voláteis e teor de carbono fixo. Para a determinação do teor de umidade foram pesados béqueres de 50 mL, previamente secos em uma estufa a 105 °C por quatro horas e colocados em um dessecador até temperatura ambiente. Três amostras de 1 g das biomassas foram pesadas nos béqueres. Em seguida, essas amostras foram levadas para estufa a 105 °C até alcançar massa constante com variação de $\pm 0,001$ g na umidade após 1 h de reaquecimento da amostra. Após este período, as amostras foram retiradas da estufa e colocadas em um dessecador até temperatura ambiente e pesadas novamente conforme a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1983). A determinação do teor de voláteis foi feita conforme a norma ABNT NBR 8112. Após a determinação do teor de umidade, a amostra foi colocada em um forno tipo mufla da marca Quimis Q318M, à aproximadamente 950 °C por sete minutos. Depois, a amostra foi colocada em um dessecador para resfriamento e posterior pesagem (ABNT, 1983)

A análise de determinação do teor de cinzas foi realizada conforme a norma ABNT NBR 8112, em que as cinzas obtidas são o resultado da oxidação completa do material combustível, composta por constituintes inorgânicos (ABNT, 1983). A determinação do teor de carbono fixo foi feita pela diferença dos resultados de teor de umidade, teor de cinzas e teor de voláteis conforme a equação (3) (ABNT, 1983).

$$T_{cf} = 100 - (T_u + T_c + T_v) \quad (1)$$

Onde: T_{cf} é o Teor de carbono fixo, T_u é o Teor de umidade, T_c o Teor de cinzas e T_v o Teor de voláteis

Análise Elementar

A análise dos elementos C, H, N, O e S foi realizada pelo método calorimétrico automatizado (THOMPSON, 2008). As amostras foram queimadas no analisador elementar TRUSPEC não dispersivo, marca Leco, equipado com um detector infravermelho. Neste equipamento, as amostras foram queimadas em atmosfera de oxigênio a temperatura de 950 °C. A análise de enxofre, em % total, foi realizada no analisador elementar modelo Leco SC-632, equipado com um detector infravermelho. Neste equipamento as amostras foram queimadas em atmosfera de oxigênio à temperatura de 1350 °C.

Poder Calorífico

Os materiais foram avaliados quanto ao Poder Calorífico Superior (PCS); que é o poder calorífico obtido em combustão e realizado a volume constante, onde a água formada pela combustão é condensada. Nesse tipo de determinação, foi utilizada uma bomba calorimétrica marca Parr, modelo 6300. Esta análise foi realizada seguindo a norma ABNT NBR 8633/84.

2.3.3 Ensaios de Fluidização

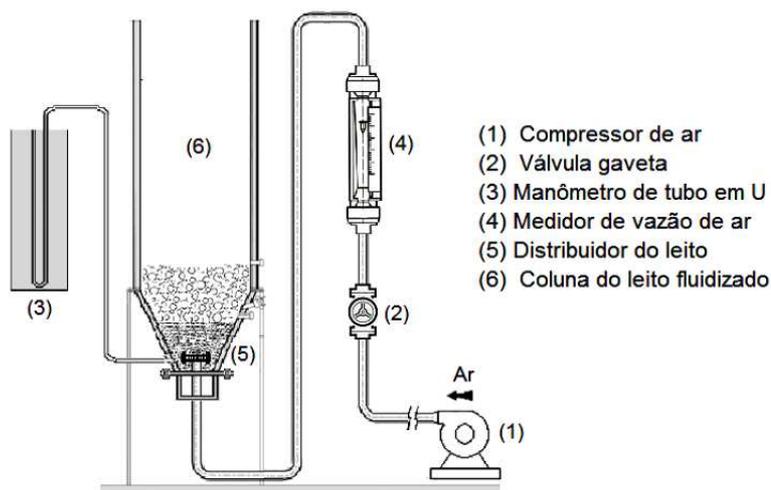
Para a realização dos testes de fluidização, foram utilizadas diferentes misturas de carvão e de biomassas. Foram adotadas as proporções de 10%, 30% e 50% de biomassas em volume total das misturas. O volume utilizado para cada reator foi diferente tendo em vista que suas dimensões não eram iguais. Foi utilizada a relação de $H \approx D$ para calcular o volume de cada mistura, onde a altura usada (H) é o valor do diâmetro interno (D) do reator. Sabendo o volume que seria utilizado e a densidade das proporções de cada elemento foram preparadas as amostras para cada reator.

Os testes de fluidização foram realizados em três reatores de bancada, um reator cilíndrico localizado na CIENTEC denominado reator 1; outro reator localizado na CIENTEC, mas com coluna de leito fluidizado de forma trapezoidal, denominado reator 2; e, por último, um reator cilíndrico localizado no laboratório da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), denominado reator 3.

Descrição dos reatores 1 e 2

OS reatores 1 e 2 foram dimensionados com corpo em acrílico de forma a permitir uma reprodução aproximada, em escala de bancada e a frio, do comportamento fluidodinâmico esperado para ocorrer nas plantas piloto de combustão e gaseificação em leito fluidizado borbulhante desenvolvidas pela CIENTEC, respectivamente. O reator 1 possui configuração trapezoidal com aproximadamente 300 mm de lado, enquanto que formato do reator 2 é circular com diâmetro de aproximadamente 200 mm.

Figura 1 – Sistema de fluidização de bancada reator 1 e reator 2



FONTE: Aguiar (2016).

A Figura 1 mostra esquematicamente o sistema do leito fluidizado de bancada com coluna em formato de trapézio, reator 2. O reator 1 possui a mesma configuração, mudando apenas a geometria da coluna do leito, que neste caso possui seção transversal circular.

A leitura da vazão de ar e a pressão interna desses fluidizadores foram feitas de forma visual e manual nos medidores (3) e (4), descritos na Figura 1. Para estes dois fluidizadores, foram realizadas medições em diferentes vazões de ar de entrada e, a partir desses valores, foi verificada a diferença de pressão para cada caso. A análise das curvas e a comparação das velocidades mínimas de fluidização foram realizadas através de gráficos gerados com os valores de perda de carga no leito (ΔP) em função da velocidade superficial do ar injetado no leito (U_s).

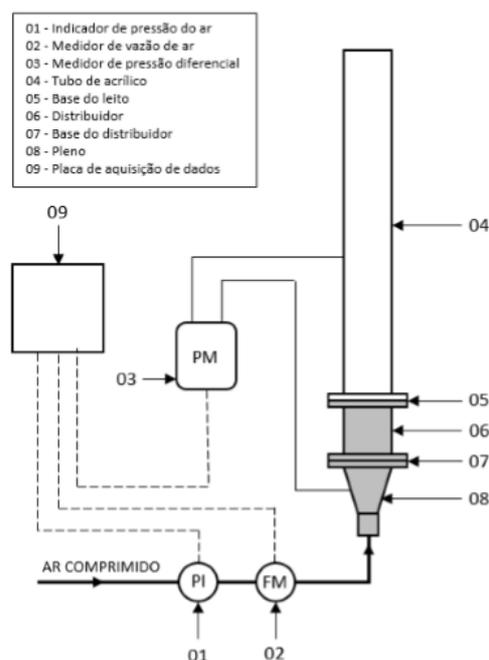
Descrição do reator 3

A bancada de fluidização foi construída a partir de um tubo acrílico cilíndrico com diâmetro interno de 94 mm (diâmetro de aproximadamente a metade do reator cilíndrico do CIENTEC) e parede com 3 mm de espessura. O gás utilizado nessa bancada foi o ar seco. Nesse experimento, foram realizadas as medidas de vazão de ar de entrada e a queda de pressão do leito para a obtenção da curva de fluidização.

A medição da vazão de ar foi feita através de um instrumento no modelo IFM SD5060. Esse equipamento possui faixa de medição de 0,2 a 75 Nm³/h, com uma precisão de $\pm 1,5\%$ e uma saída de sinal analógico de 4 a 20 mA.

A medição de pressão no leito foi determinada a partir da diferença de pressões do fundo do leito com ponto após a coluna, onde o material era mantido sob fluidização. A diferença de pressão foi medida com um instrumento NOVUS, modelo HUBA 699, com faixa de medição de 0 a 2500 Pa e saída analógica de 4 a 20 mA. A aquisição e gravação dos dados experimentais foram realizadas por um módulo NOVUS Fieldlogger. Este dispositivo possuía oito entradas analógicas ou digitais e suportava conexão USB para transferir dados para um computador. Os instrumentos de medição eram conectados ao módulo através de cabos e alimentados por uma fonte estabilizada, com tensão de saída de 24 Vdc. Todos os dados eram gravados ao mesmo tempo, com uma frequência de aquisição de 1 Hz.

Figura 2 – Esquema da bancada de fluidização - reator 3



FONTE: Genehr (2015).

Procedimento de coleta de dados fluidodinâmicos

Em todas as bancadas de fluidização, antes de se obterem as curvas de velocidade por variação de pressão, as amostras foram submetidas ao máximo valor de vazão de cada bancada para que ocorresse a homogeneização do leito. Essa homogeneização, principalmente no reator 3, evitava uma possível segregação das partículas.

Após a mistura completa das amostras de combustível, iniciava-se o processo para obtenção das curvas. Nos reatores 1 e 2, a válvula de ar foi aberta lentamente e as anotações de vazão de ar e pressão eram lidas continuamente. Nesses reatores, as leituras foram feitas visualmente de 50 NL/min em 50 NL/min até 1300 NL/min, uma vez que, acima deste valor de vazão, as partículas eram ejetadas do sistema. No reator 3, a válvula foi aberta de maneira mais sensível em função dos valores de pressão serem gravados continuamente pelo sistema de aquisição eletrônica de dados (*logger*). A vazão máxima utilizada nesse reator foi 30 NL/h. As avaliações foram realizadas em triplicata.

Proporções das misturas

Nas Tabelas 1, 2, e 3 são apresentadas as massas e as proporções de cada combustível utilizadas nos três reatores. São informadas as quantidades de carvão para cada proporção e para cada biomassa associada. Para o reator 1 foi utilizado o volume total de 3.500 cm³.

Tabela 1 – Proporção e massa de cada amostra no reator 1

Proporção de biomassa	Massa de carvão (g)	Massa de casca de nabo forrageiro (g)	Massa de bagaço de cana (g)
10%	3402,00	46,34	25,02
30%	2646,00	139,02	75,06
50%	1890,00	231,70	125,10

Para o reator 2 foi utilizado um volume de 10.000 cm³, por ser um reator maior, a relação H≈D não foi pelo diâmetro, mas sim pela largura do reator.

Tabela 2 – Proporção e massa de cada amostra no reator 2

Proporção de biomassa	Massa de carvão (g)	Massa de casca de nabo forrageiro (g)	Massa de bagaço de cana (g)
10%	9.720,00	132,40	71,49
30%	7.560,00	397,20	214,47
50%	5.400,00	662,00	357,45

Para o reator 3 foi realizada a fluidização de 652 cm³ de amostra. Esse volume utilizado foi adotado para que, a altura do leito ficasse próxima ao diâmetro do reator. As amostras para esse reator também foram preparadas nas proporções de 10%, 30% e 50% em volume.

Tabela 3 – Proporção e massa de cada amostra no reator 3

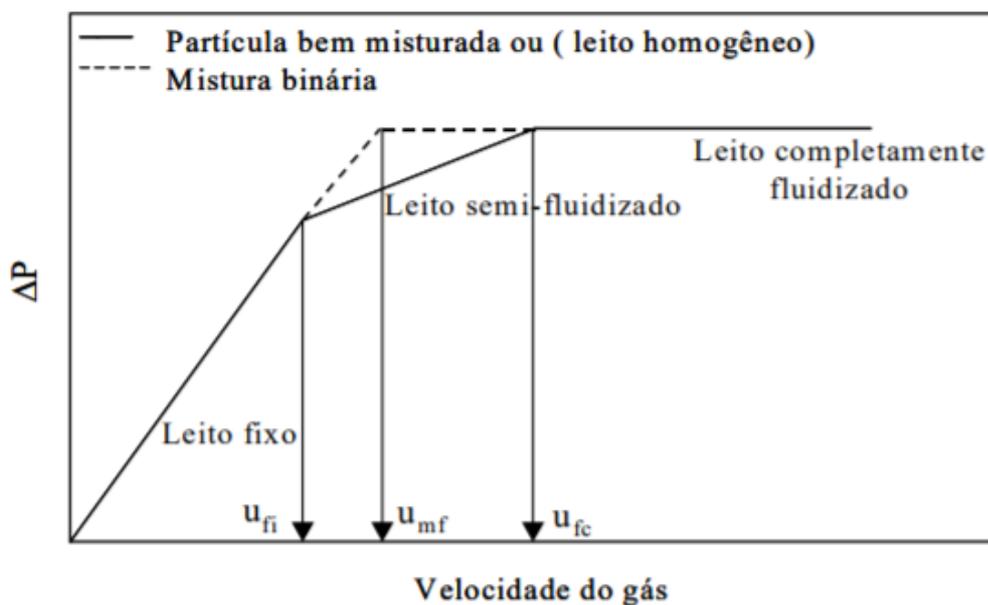
Proporção de biomassa	Massa de carvão mineral (g)	Massa de casca de nabo forrageiro (g)
10%	633,74	8,63
30%	492,91	25,90
50%	233,10	45,90

Determinação das velocidades características de fluidização

O comportamento do fluido no leito é influenciado pelas características das partículas que compõe a mistura binária no interior do leito. A granulometria, a forma, as características energéticas e a proporção da biomassa presente no leito interferem diretamente no processo de fluidização. Essa influência pode ser analisada através da perda de carga, da velocidade de mínima fluidização e da quantidade de material que é transportada para fora do leito (SILVA, 2011). A Figura 3 ilustra uma curva em que é determinada a velocidade de fluidização.

De acordo com GAUTHIER et al, (1999), para algumas misturas binárias de partículas, além da velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), as velocidades de fluidização incipiente (U_{fi}) e de fluidização completa (U_{fc}) são importantes na caracterização do sistema fluidodinâmico.

Figura 3 - Determinação da velocidade de mínima fluidização.



Fonte: Adaptado de Lourenço (2012).

Na Figura 3, observa-se que a abscissa do ponto que intercepta as curvas de leito fixo e leito semi-fluidizado corresponde a velocidade de fluidização incipiente (U_{fi}), já a abscissa do ponto de intersecção das curvas de leito semi-fluidizado e de leito completamente fluidizado, equivale à velocidade de fluidização completa. Por fim, a velocidade mínima de fluidização, encontra-se na região chamada domínio de transição pertencente as duas velocidades U_{fi} e U_{fc} (GELDART, 1978).

2.3.4. Ensaios de Combustão na Unidade de Bancada

Para a comparação das emissões de gases, foi realizada a combustão em uma unidade de bancada, em que foram analisados continuamente os gases SO_2 e NO_x . Essa unidade é composta por um reator tubular de quartzo de leito fixo de 1,5 cm de diâmetro e 100 cm de comprimento, no interior do qual, inseria-se 100 mg da amostra com granulometria entre 200 a 325 mesh. O leito era posicionado no reator de forma que a sua posição intermediária coincidissem com a leitura do termopar do forno. O reator era acoplado a um forno tubular vertical (marca Sanchis) e aquecido até 800 °C a uma taxa de 10°C/min sob fluxo de 100 mL/min de ar sintético. A saída do reator foi conectada a um analisador de gases de combustão marca Bacharach (Modelo PCA3), sendo a concentração de SO_2 e NO_x ($NO + NO_2$) anotadas a cada minuto. Para essa análise não foram realizadas repetições, apenas realizada uma avaliação para cada amostra.

Figura 4 – Foto da Unidade de bancada em que foi realizada a combustão



2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.4.1. Potencial Energético das Biomassas Utilizadas

O tamanho da partícula, a densidade específica e aparente, o Poder Calorífico, as análises elementar e imediata do carvão e das biomassas foram caracterizadas para serem utilizados na fluidização e na co-combustão. Na Tabela 4 são apresentadas as propriedades físicas dos combustíveis.

Tabela 4 - Propriedades físicas das partículas

Propriedades	Tamanho da partícula (mm)	Massa específica (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Poder calorífico (kJ/kg)
Carvão	0,35	1,66	1,08	18.830
Casca de nabo forrageiro	0,42	0,15	0,13	20.150
Bagaço de cana-de-açúcar	0,84	1,16	0,07	17.100

As partículas utilizadas para o bagaço de cana-de-açúcar (0,84 mm) possuem o dobro do tamanho das partículas da casca de nabo forrageiro (0,42 mm).

O poder calorífico da casca do nabo forrageiro, possui um valor (20.150 kJ/kg) próximo ao valor encontrado do carvão mineral (18.830 kJ/kg).

Os valores encontrados de massa específica (0,15 g/cm³) e massa específica aparente (0,13 g/cm³) para a casca de nabo forrageiro são menores quando comparados com os valores da casca acácia negra encontrados por LINHARES (2017), que obteve valores de 0,47 g/cm³ e 0,42 g/cm³, respectivamente. O que chamou atenção, foram os valores de densidade específica e aparente do bagaço de cana-de-açúcar que foram bem diferentes 1,16 g/cm³ e 0,07 g/cm³, respectivamente.

São apresentados, nas Tabelas 5 e 6, as análises elementar e imediata do carvão, da casca do nabo forrageiro e do bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 5 - Análise elementar do carvão, da casca do nabo forrageiro e do bagaço de cana-de-açúcar em base seca

Composição	Carvão mineral	Casca de Nabo Forrageiro	Bagaço de cana-de-açúcar
Carbono (%)	33,8	42,89	43,35
Hidrogênio (%)	2,3	6,25	6,25
Oxigênio (%)	6,4	44,85	45,79
Enxofre (%)	1,9	0,75	0,05
Nitrogênio (%)	0,6	2,98	2,10

Com a análise elementar dos combustíveis é possível identificar que a casca de nabo forrageiro e o bagaço de cana-de-açúcar possuem valores aproximados de carbono (42,89% e 43,35%, respectivamente), maiores que o valor do carvão avaliado (33,80%). É possível identificar também que, o valor de enxofre para o carvão é maior do que o encontrado nas biomassas. Esse valor irá influenciar na emissão de SO₂ quando a combustão for realizada. Identificamos também que, os valores de nitrogênio são menores no carvão do o valor encontrado nas duas biomassas e o valor para o nabo forrageiro (2,98%) é maior do que o encontrado para o bagaço de cana-de-açúcar. Nos trabalhos de OCANHA (2017) e MACHADO (2016), não foram encontrados valores de nitrogênio para o bagaço de cana-de-açúcar que avaliaram.

Tabela 6 – Análise imediata do carvão, da casca de nabo forrageiro e do bagaço de cana-de-açúcar

Composição	Carvão	Casca de Nabo Forrageiro	Bagaço de cana-de-açúcar
Umidade	17,10	9,74	8,58
Teor de voláteis	23,00	78,19	74,82
Quantidade de cinzas	55,00	4,88	3,56
Carbono fixo	22,00	7,19	13,05

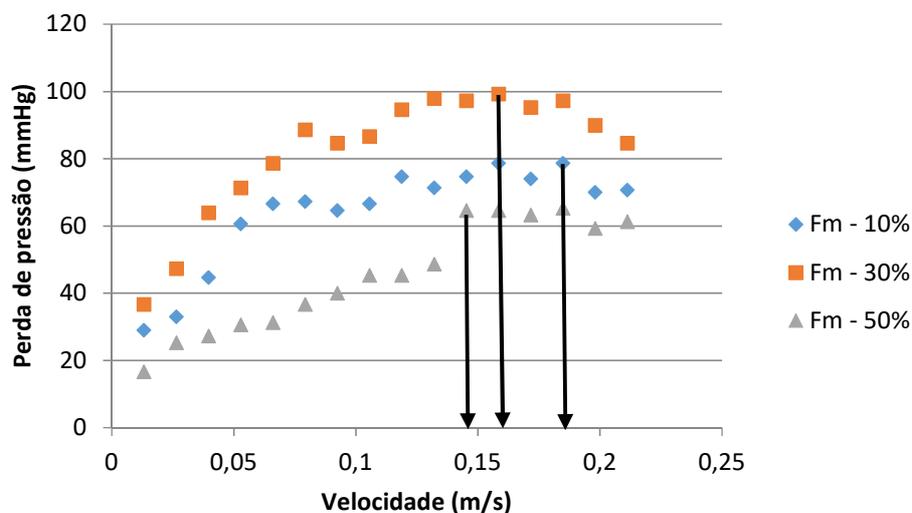
A umidade do carvão é maior do que a umidade do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de nabo forrageiro. O principal motivo dessa umidade maior é que, essas biomassas foram secadas antes de fazer a caracterização. O teor de voláteis do bagaço de cana-de-açúcar (74,82%) é diferente do encontrado em outras regiões do país. SOUZA (2013), encontrou no bagaço de cana-de-açúcar (84,54%) resultado em base seca e SEYE et al. (2003), encontrou (69,39%). O teor de Voláteis encontrado para o nabo forrageiro (78,19%), foi muito parecido do valor encontrado por ARAÚJO (2017) (77,03%), para a torta do nabo forrageiro produzido no Paraná. A cinza encontrada para a casca do nabo forrageiro e para o bagaço de cana-de-açúcar (4,88% e 3,56%), também possuem valores muito menores do valor encontrado para o carvão mineral (55%). Avaliado, esse alto valor de cinzas é característica do carvão gaúcho.

2.4.2. Velocidades de Fluidização

A seguir serão apresentados os gráficos da velocidade do ar em função da diferença de pressão. A partir desses gráficos serão determinadas as velocidades mínimas de fluidização para cada reator.

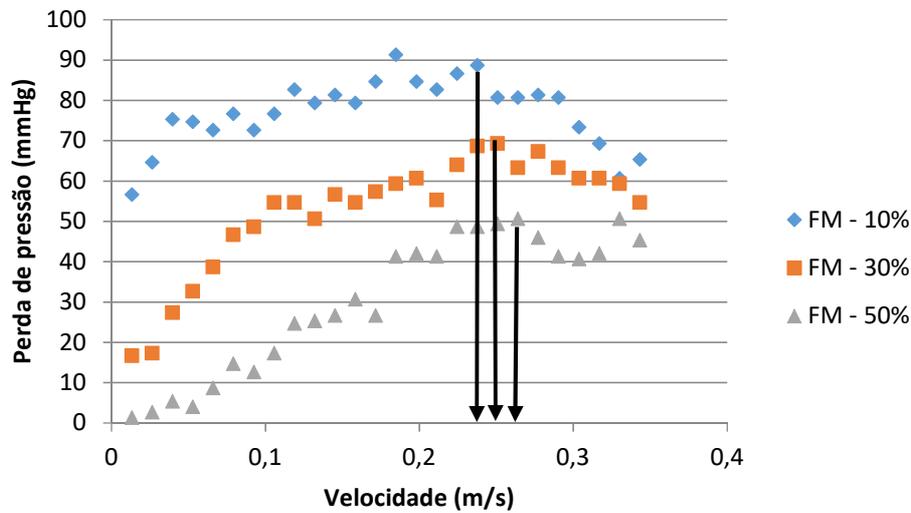
Na figura 5 são apresentadas as curvas de velocidade do ar em função da diferença de pressão para o reator 1 em diferentes proporções de casca de nabo forrageiro e carvão mineral (10%, 30% e 50%). Na figura 6 são apresentadas as mesmas proporções com bagaço de cana-de-açúcar. Nas figuras 3.1, 3.2 e 3.3 F_m representa a média das três fluidizações realizadas para cada amostra.

Figura 5 – Mistura de 10%, 30% e 50% de casca de nabo forrageiro com carvão mineral no reator 1



As velocidades mínimas de fluidização encontradas para cada mistura foram de, aproximadamente, 0,14 m/s para a mistura de 50%, 0,16 m/s para a mistura de 30% de biomassa e 0,18 m/s para a mistura com 10 % de biomassa. Os pontos marcados no gráfico, apresentam as velocidades em que a fluidização foi visualizada no reator. Nos trabalhos de SILVA (2017) e OCANHA (2017), que trabalharam com cavacos de macieira e bagaço de cana-de-açúcar, respectivamente, verificou-se que, na medida que aumenta a proporção de biomassa, a velocidade mínima de fluidização também aumenta, diferentemente do que ocorreu nesse teste com o reator. Cabe ressaltar que, a fluidização com cavacos de macieira realizada por SILVA (2017), foi realizada como material inerte, a areia, e não com carvão mineral.

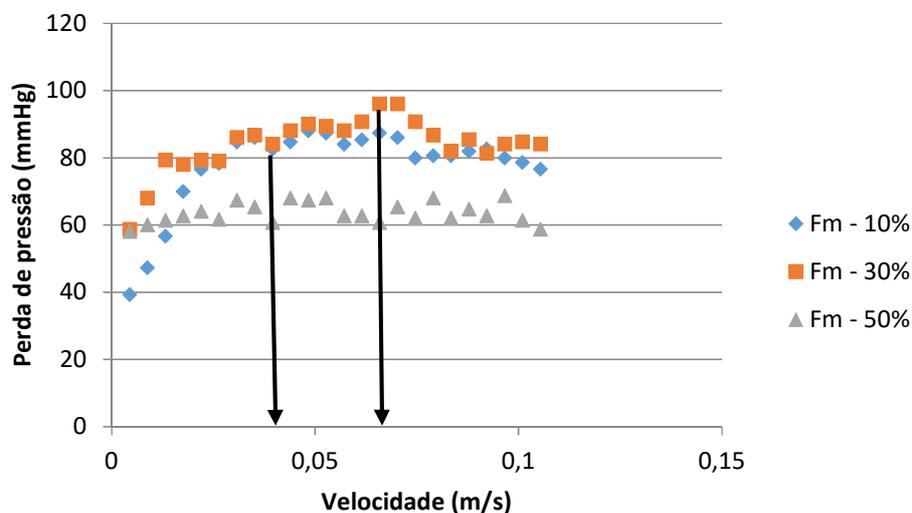
Figura 6 – Mistura de 10%, 30% e 50% de bagaço de cana-de-açúcar com carvão mineral no reator 1



Nessas misturas, as velocidades mínimas de fluidização verificadas no reator, foram de aproximadamente 0,24 m/s para a mistura de 10%, 0,25 m/s para a mistura de 30% e 0,26 m/s para a mistura de 50%. Com o bagaço de cana associado ao carvão, é possível identificar que, a velocidade mínima de fluidização aumenta na medida que a proporção aumenta. Esta verificação foi realizada por LINHARES (2016), que fluidizou carvão associado a resíduos de casca de acácia negra, no entanto, nesse trabalho foi utilizado, além de carvão, uma porcentagem de material inerte (areia) para ajudar na fluidização.

No reator 2, não foi possível fluidizar o carvão com bagaço de cana de cana-de-açúcar, pois, utilizando-se essa biomassa, teríamos dificuldade de retirar o material. Assim, no reator 2, foram realizadas apenas fluidizações com casca de nabo forrageiro. Na figura 7, são apresentadas as fluidizações com as 3 proporções de casca de nabo forrageiro.

Figura 7 – Mistura de 10%, 30% e 50% de nabo forrageiro com carvão mineral no reator 2



No reator 2 foi possível verificar as velocidades mínimas de fluidização, somente nas misturas com 10% e 30% de biomassa. A mistura com 50%, manteve as perdas de carga praticamente constantes com a variação de velocidade. Assim, não foi possível verificar o ponto de velocidade mínima de fluidização. Os valores encontrados para as outras duas misturas são aproximadamente 0,064 m/s para a mistura de 30% e de 0,042 m/s para a mistura de 10%. No trabalho de LINHARES (2016), utilizando esse mesmo reator, mas com resíduos de casca de acácia negra encontrou-se um valor de 0,07 m/s na proporção com 30% de biomassa e 0,09 m/s. Nesse trabalho, não foi realizada a fluidização com apenas 10% de biomassa, mas em todas as proporções foram utilizados 3% de material inerte.

Na figura 8 são apresentadas as curvas de perda de carga das misturas de carvão mineral e casca de nabo forrageiro realizadas no reator 3. Para essa biomassa, serão apresentadas as mesmas proporções de 10%, 30% e 50%. Como nesse reator a obtenção de dados é feita através de um programa, não é possível utilizar a mesma variação de vazão para todas as misturas, então tornou-se complicado colocar no mesmo gráfico as três curvas. Assim, gerou-se três gráficos, um para cada mistura. Nesses gráficos F1, F2 e F3 significam as três fluidizações realizadas para cada amostra

Figura 8 – Mistura de 10% de casca de nabo forrageiro no reator 3

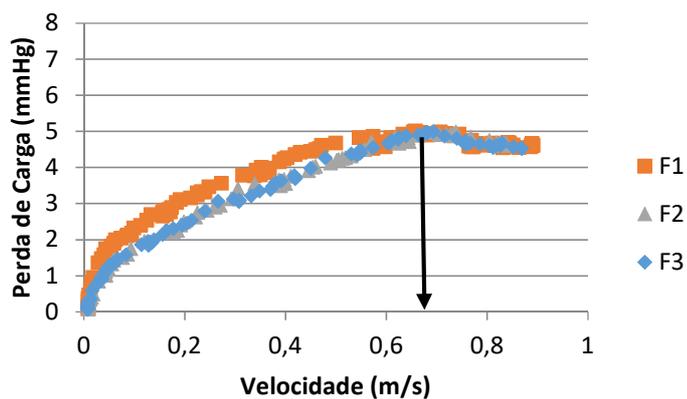


Figura 9 – Mistura de 30% de casca de nabo forrageiro no reator 3

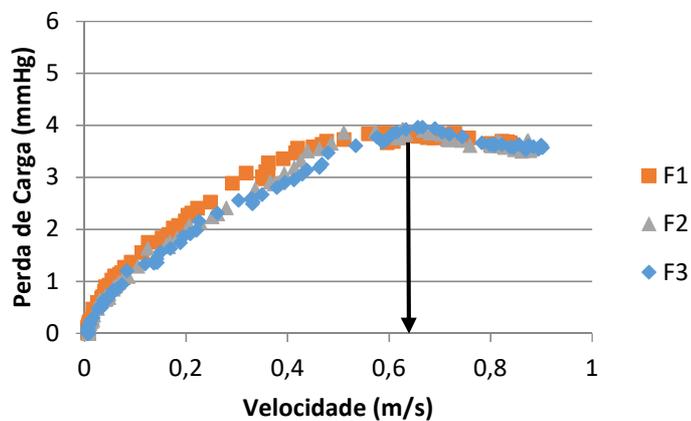
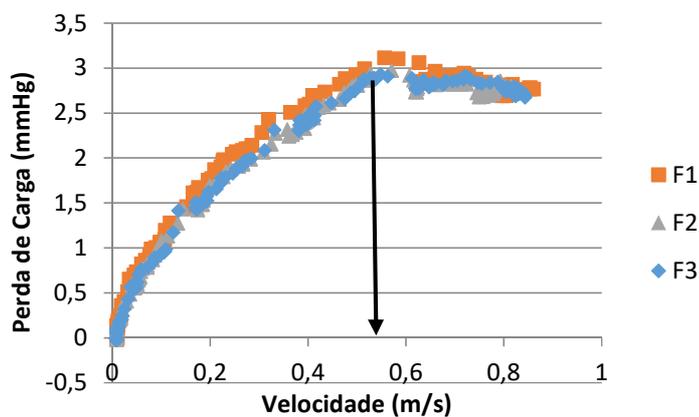


Figura 10 – Mistura de 50% de casca de nabo forrageiro no reator 3



É possível verificar na figura 10, a velocidade mínima de fluidização no valor de aproximadamente (0,56 m/s) para a mistura de 50%; na figura 9 (0,64 m/s) para a mistura

com 30% de biomassa e na figura 8 (0,68 m/s) para a mistura com 10% de casca de nabo forrageiro. Nota-se que, na medida em que a quantidade de biomassa diminui, a velocidade mínima de fluidização aumenta. Gomes (2017), realizou fluidização com casca de nabo forrageiro com material inerte (areia), e o valor encontrado para a mistura de 15% foi (0,072 m/s). Para a mistura de 40 %, o Autor encontrou valores de (0,17 m/s). Apesar das proporções não serem as mesmas, é possível identificar que, a velocidade mínima de fluidização é muito menor do que a encontrada na fluidização com casca de nabo forrageiro e carvão mineral.

No reator 3 não foram realizadas as fluidizações com bagaço de cana-de-açúcar, pois OCANHA(2017), realizou essas fluidizações usando a mesma metodologia.

O mesmo Autor, OCANHA (2017), na mistura de carvão mineral com 20% de bagaço de cana-de-açúcar, a velocidade mínima de fluidização encontrada foi de aproximadamente (0,6 m/s) enquanto que, para 40% encontrou-se um valor de aproximadamente (0,75 m/s). No trabalho realizado por Gomes (2017), que fez a fluidização com bagaço de cana de-açúcar e material inerte, neste mesmo reator, a velocidade mínima encontrada foi de (0,18 m/s) para 21% de bagaço de cana-de-açúcar e (0,81m/s) para a proporção de 50%. Cabe ressaltar qu,e o autor preparou as proporções em função de massa ao invés de volume.

OCANHA (2017), estudou também a fluidização de casca e bagaço de cana-de-açúcar com carvão e bagaço e casca de cana-de-açúcar com areia, identificando que, a fluidização ocorreu com 20%, 40%, 60% e 80% de biomassa em volume com areia, mas, utilizando somente carvão, a fluidização somente ocorreu com até 60% de biomassa.

O processo de fluidização também foi estudado por GENEHR (2015), utilizando eucalipto e pinus no reator 3. O autor identificou que, a fluidização somente com essas biomassas, não ocorreu e necessitou da utilização de 79% em massa de material inerte para que ocorresse a fluidização.

OLIVEIRA (2013), avaliou a velocidade mínima de fluidização para diferentes biomassas, todas elas utilizando material inerte (areia). As proporções utilizadas foram de 5%, 10% e 15%. Uma das biomassas utilizadas foi o bagaço de sorgo sacarino com tamanho médio da partícula de 0,90 mm e areia com partícula média de 0,56 mm, nessas condições as velocidades mínimas de fluidização encontradas 0,103, 0,102 e 0,095 m/s para as proporções de 5%, 10%, e 15%, respectivamente. A velocidade encontrada na proporção de 10% por OLIVEIRA (2013), (0,103 m/s) é próximo as velocidades encontradas no reator 1, com a proporção de 10% de bagaço de cana-de-açúcar (0,25 m/s)

e 10% de casca de nabo forrageiro (0,18 m/s). É importante destacar que, no trabalho de OLIVEIRA (2013), na mistura de bagaço de sorgo sacarino, verifica-se que na medida que a proporção de biomassa aumenta a velocidade mínima de fluidização diminui. Essa reação é a mesma que ocorreu na mistura de carvão mineral com casca de nabo forrageiro, nos três reatores estudados. Isto acontece, provavelmente, devido a irregularidade das partículas.

Os resultados experimentais apresentados mostram características de fluidização semelhantes às de um sistema convencional com um único componente, mesmo não sendo possível gerar uma curva de fluidização tão boa nos reatores 1 e 2. Apenas a proporção com 50 % de bagaço de cana-de-açúcar no reator 2 não foi possível fluidizar, pelo fato de ter se formado caminhos preferenciais dentro do reator. De acordo com KUNII et al, (1991), para maiores porcentagens de biomassa o processo de fluidização torna-se difícil pelo surgimento de slugging e variações significativas na pressão.

No trabalho avaliou-se o comportamento das misturas e o efeito da segregação. Inicialmente, as misturas binárias de partículas de biomassa e carvão mineral foram bem misturadas. Na medida em que, a fluidização iniciou, o leito foi se expandindo parcialmente, mas as partículas de biomassa e carvão mineral permaneceram misturadas. Quando a velocidade do ar se aproximou da velocidade mínima de fluidização, as partículas permaneceram misturadas, sem segregação, mostrando bom comportamento fluidodinâmico. Esse comportamento foi melhor verificado nas misturas de carvão mineral e casca de nabo forrageiro.

As bolhas que se formam durante a fluidização levam partículas para fora do leito, principalmente, partículas de biomassa pela densidade ser menor. Na medida em que, as bolhas vão aumentando e a velocidade mínima de fluidização é ultrapassada, as partículas de biomassa foram se depositando na superfície do leito, aumentando gradualmente o efeito da segregação. Esse efeito foi verificado principalmente, com a mistura de bagaço de cana-de-açúcar. As diferenças de densidade e tamanhos entre as partículas da mistura também contribuem para a ocorrência de segregação no leito. Geralmente, o componente mais denso migra para a base do leito, enquanto o componente menos denso (biomassa) tende a migrar para o topo do leito ZHANG et al (2009).

Em nenhum dos reatores foi verificado a formação de Sluggings. Isso acontece normalmente em leitos consideravelmente profundos e de diâmetro pequeno, já que esse fenômeno produz grandes variações na pressão dentro do leito. Um regime de slugging, só ocorre quando a relação entre a altura do leito fixo (H) e seu diâmetro (D) é maior do

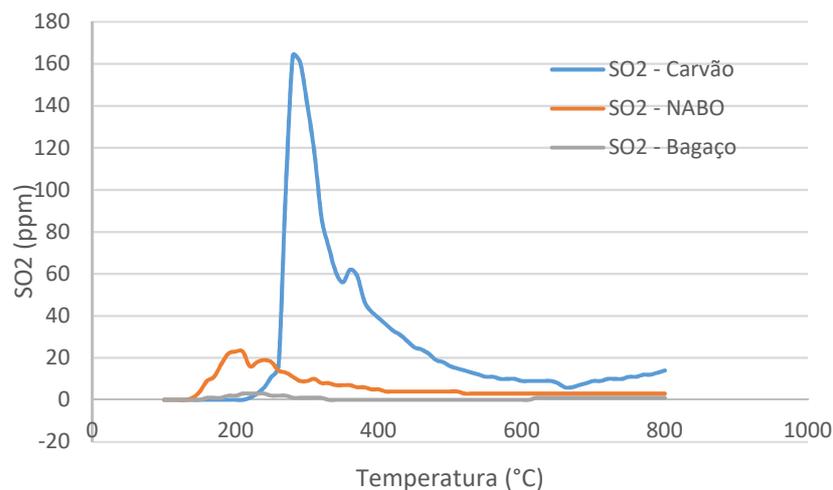
que 2. Para valores maiores que 2, o leito entra no regime de slugging com um fluxo periódico de grandes bolhas e grandes variações na pressão em todo o leito (YANG et al, 2009).

2.4.3. Emissões Geradas na Combustão de Carvão e Biomassa

Os gases avaliados na combustão do carvão e biomassa na planta de bancada foram os gases NO_x e SO_2 .

O carvão utilizado nessa combustão, assim como, as biomassas, são as apresentadas na caracterização dos materiais desse trabalho. Foram gerados nas Figuras 10 e 11 curvas de NO_x e SO_2 em função da temperatura. As avaliações realizadas foram somente com carvão, somente bagaço de cana e somente nabo forrageiro.

Figura 11 – Emissões de SO_2 com a variação de temperatura para carvão, casca de nabo forrageiro e bagaço de cana-de-açúcar



Na Figura 11, é possível verificar a diferença de emissões de SO_2 entre o carvão e as biomassas. Verifica-se que, a emissão de SO_2 liberada na combustão do carvão (164 ppm), é quase 10 vezes maior do que a liberada pelo nabo forrageiro (23 ppm). Essa diferença é ainda maior quando comparada com a emissão do bagaço de cana (3 ppm). No trabalho realizado por CASTRO (2017), a emissão de SO_2 com puro carvão foi de aproximadamente 173 ppm, enquanto que, utilizando a combustão de pura casca de arroz a emissão foi de 4 ppm. Nota-se que, o nabo forrageiro emite uma quantidade maior que outras biomassas, mas muito menor do que a combustão de carvão puro.

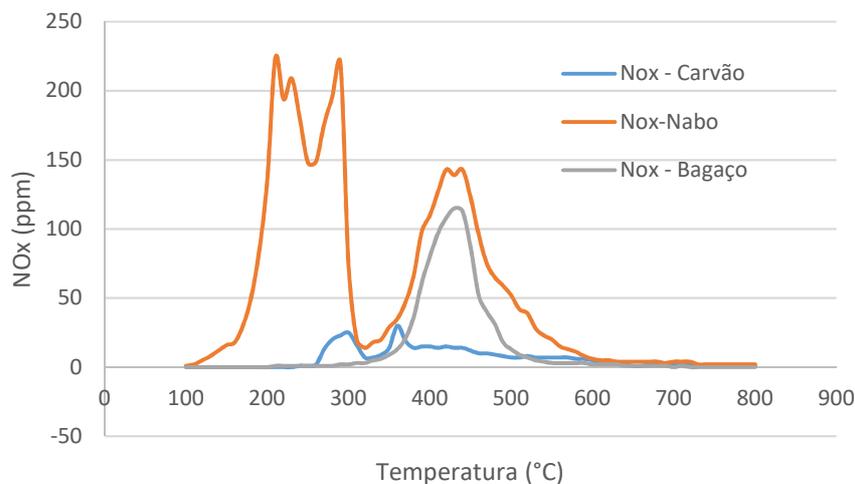
As biomassas apresentam valores elevados de energia por unidade de massa (PCS) e de material volátil os quais fazem com que a combustão ocorra em temperaturas menores que o carvão mineral e sejam geradas menores quantidades de resíduos sólidos (cinzas), indicando assim combustíveis favoráveis para geração de energia. Os picos de SO_2 nas biomassas se dão com valores de temperaturas mais baixos do que o carvão. Para o bagaço de cana o pico foi em $210\text{ }^\circ\text{C}$, para o nabo forrageiro o pico foi em $200\text{ }^\circ\text{C}$, enquanto que, para o carvão mineral o pico de emissões de SO_2 se deu em $280\text{ }^\circ\text{C}$.

PEDERSEN et al (1997), estudaram a combustão de palha com carvão pulverizado em uma planta piloto de 2,5 MWt. Os Autores verificaram que, aumentando a quantidade de biomassa no reator, resultou na redução de NO_x e SO_2 . Segundo os autores, a redução de SO_2 se deu em parte pelo baixo teor de enxofre da biomassa e parte pela retenção de enxofre nas cinzas.

SPLIETHOFF et al (1998), avaliou o efeito da co-combustão de biomassa nas emissões em fornos de combustíveis pulverizados. Como a biomassa, na maioria das vezes, possui menor valor de enxofre do que o carvão, na medida que aumentada a proporção de biomassa, as proporções de SO_2 também diminuem. Além disso, os componentes alcalinos na cinza de biomassa podem ter um efeito de remoção de SO_x .

Nessa unidade de bancada também foi identificado os níveis de NO_x encontrados na combustão desses combustíveis. Esses níveis estão diretamente relacionados ao teor de nitrogênio presente na composição dos combustíveis de alimentação e da oxidação do ar. A reação que gera essencialmente o NO_x é afetada pela temperatura de combustão, que acima de $1400\text{ }^\circ\text{C}$ favorece exponencialmente a geração de NO. Por esse motivo, os reatores de leito fluidizado representam vantagem, tendo em vista que trabalham com temperaturas de combustão que não passam de $900\text{ }^\circ\text{C}$. A seguir são apresentadas as emissões de NO_x com variação de temperatura.

Figura 12 - Emissões de NO_x com a variação de temperatura para carvão, nabo forrageiro e bagaço de cana



Diferentemente do SO₂, as emissões de NO_x são maiores para as biomassas quando comparadas com o carvão mineral. O nabo forrageiro, por sua vez, emite quantidade de NO_x (224 ppm) muito maior que o bagaço de cana (105 ppm) e, além disso, ocorrem dois picos de emissões, o primeiro entre 200 °C e 300 °C e o segundo em 430 °C. Para o bagaço de cana ocorre somente um pico que ocorre na mesma temperatura do segundo pico do nabo forrageiro. O carvão mineral possui o pico de emissão (25 ppm), de NO_x aproximadamente em 300 °C e posteriormente mais um pico (30 ppm) em 350 °C.

LIU et al (2002), estudaram as emissões de N₂O na co-combustão em um reator de leito fluidizado em escala de bancada. Eles verificaram que, a co-combustão de carvão e biomassa podem reduzir também as emissões de N₂O e NO_x. Verificaram que, ocorre redução desses gases na medida que aumenta a proporção de biomassa. Uma explicação dada pelos autores é a de que na biomassa ocorre a liberação rápida de voláteis na parte inferior do leito, o que produz muitos radicais que causam consumo de oxigênio no local e oxidam N₂O e NO_x.

Segundo PEDERSEN et al (1997), a redução das emissões de NO deve-se a uma menor quantidade de nitrogênio no combustível. Aumentar a fração de palha resultou em uma maior liberação de voláteis, incluindo NO, levando a condições que podem suprimir a formação de NO a partir de nitrogênio combustível.

KAZAGIC et al. (2006) registraram reduções significativas nas emissões de NO_x e SO₂ na medida em que, a temperatura de combustão diminuiu. Para todas as misturas utilizadas pelos autores, identificaram uma redução de 50% na medida que a temperatura

foi reduzida de 1400 para 960. No entanto, não encontraram mudança nas emissões de NO_x para as diferentes misturas de biomassa com carvão. Os autores também fizeram a comparação com diversos carvões e identificaram redução maior de NO_x para a co-combustão de um tipo de carvão comparado com outro tipo.

O teste realizado mostra que a co-combustão é eficiente para minimizar as emissões de SO_2 , o que é crítico, em se tratando do nosso carvão, que possui alto teor de enxofre.

Foram encontrados muitos trabalhos na qual realizou-se a avaliação das emissões de NO_x e SO_2 em plantas em operação (HEMANT KUMAR (2015), NARAYANAN (2007), NUSSBAUMER (2003), PEDERSEN, et al (1996), MOLCAN, et, al (2007). Geralmente, a emissão desses gases diminui devido ao menor teor de nitrogênio e enxofre dessas biomassas, mas diminui proporcionalmente a quantidade utilizada.

Quando o carvão é associado a biomassa, na maior parte das vezes, diminui as emissões de SO_2 proporcionalmente a quantidade de biomassa utilizada, já que a maioria das biomassas possuem menos enxofre do que o carvão.

Já as emissões de NO_x podem aumentar diminuir ou permanecer as mesmas conforme a biomassa utilizada e as condições de operação (BAXTER, 2005). Por exemplo, a madeira possui quantidade menor de nitrogênio então a co-combustão de carvão com madeira tende a diminuir as emissões de NO_x . Se tratando da emissão dos gases, em termos de atender a legislação, o maior problema na combustão de carvão é a emissão de SO_2 , pois o aumento da emissão de NO_x se dá principalmente pela temperatura de operação que no caso, que no caso do leito fluidizado a temperatura é menor e por isso a emissão também é menor.

Essas biomassas para o uso na co-combustão possuem um grande diferencial levando em conta que, seu uso pode ser feito em qualquer local e, a geração dessas biomassas não teriam altos custos, tendo em vista que sua matéria principal já foi utilizada para outro fim. Na fluidização, a casca do Nabo forrageiro apresenta boas características, pois na medida em que aumenta a quantidade de biomassa, a velocidade mínima também aumenta.

2.5. CONCLUSÕES

- ✓ Para a fluidização com as cascas de nabo forrageiro associadas ao carvão mineral foi verificado que, na medida em que aumenta a proporção de biomassa, a velocidade mínima de fluidização diminui, sendo que, esse fato foi encontrado nos três reatores avaliados;
- ✓ Para a mistura de carvão mineral e bagaço de cana de açúcar-de-açúcar verificou-se que, na medida em que aumenta a proporção de biomassa, a velocidade mínima de fluidização também aumenta;
- ✓ Em todos os reatores, na mistura de carvão mineral e casca de nabo forrageiro, foi possível observar que quando a velocidade do ar se aproximou da velocidade mínima de fluidização, as partículas permaneceram misturadas, sem ocorrer segregação, mostrando um bom comportamento fluidodinâmico.
- ✓ No reator 2, a mistura com 50% de casca de nabo forrageiro manteve as perdas de carga praticamente constantes com a variação de velocidade, por esse motivo, não foi possível verificar o ponto de velocidade mínima de fluidização dessa amostra;
- ✓ Não foi verificado em nenhum dos reatores a formação de Sluggings;
- ✓ O nabo forrageiro emite uma quantidade maior de SO_2 (23 ppm), comparado com o bagaço de cana de açúcar que é de (3 ppm). No entanto, é muito menor quando comparada com o valor do carvão mineral (173 ppm).
- ✓ Os valores encontrados de NO_x para o carvão de mineral (30 ppm), foram menores quando comparados com o nabo forrageiro (224 ppm) e o bagaço de cana-de-açúcar (105 ppm).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos identificou-se que, o comportamento fluidodinâmico da velocidade mínima de fluidização em função da proporção carvão mineral e casca de nabo forrageiro foi inversamente proporcional à mistura do carvão mineral associado ao bagaço de cana-de-açúcar. Em todos os reatores, na mistura de carvão mineral e casca de nabo forrageiro, foi possível observar que, quando a velocidade do ar se aproximou da velocidade mínima de fluidização as partículas permaneceram misturadas, sem ocorrer segregação, mostrando um bom comportamento fluidodinâmico; No reator 2, a mistura com 50% de casca de nabo forrageiro manteve as perdas de carga praticamente constantes com a variação de velocidade; Em nenhum dos reatores e com nenhuma amostra foi verificado a formação de Sluggings;

Observou-se também que, o nabo forrageiro, emitiu mais SO_2 e NO_x quando comparado com o bagaço de cana-de-açúcar, no entanto, menos emissão de SO_2 do que o carvão mineral. Os valores encontrados de NO_x para o carvão de mineral foram menores quando comparados com o nabo forrageiro e o bagaço de cana-de-açúcar.

Sugere-se para trabalhos futuros fazer a co-combustão em uma planta Piloto de leito fluidizado localizada nos laboratórios do CIENTEC utilizando as biomassas e o carvão mineral utilizado nesse trabalho.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, A.V. de. **Uso de Torta de Nabo Forrageiro e Sabugo de Milho com Pó de Serra de Eucalipto para Produção de Biocombustíveis Sólidos**. 76 f. Dissertação (Mestrado) BIOENERGIA, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2017.

BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds**. Nova Scotia: Taylor & Francis, 2006.

BAXTER L. **Biomass–coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy**. *Fuel* 2005;84:1295–302.

BRASIL. **MME-Ministério de Minas e Energia**. Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2016. Brazilian Energy Balance Year 2013. (2014). Retrieved from https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2014_Web.pdf.

CALEGARI, A. **Espécies para cobertura de solo em Plantio direto: pequena propriedade sustentável**. Londrina: Iapar, p.65-94, 1998.

CASTRO, M.S.E; FONTOURA, A.M.L; PRIEBE G.P.S; SOUZA G. **Estudo da utilização de casca de arroz, cavaco de eucalipto e aparas de couro para a geração de energia via co-combustão**. V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral (2017). Criciúma – SC.

CHIBA, S. et al. **The minimum fluidization velocity, bed expansion and pressure-drop profile of binary particle mixtures**. *Powder Technology*, v. 22, p. 255-269, 1979.

CONAB. **Companhia Nacional do Abastecimento**. *Acomp. safra bras. cana*, v. 2 - Safra 2015/16, n. 3 - terceiro levantamento, Brasília, p. 1-65, dezembro 2015.

CRUSCIOL, C.A.C. et al. **Persistência de palhada e liberação de nutrientes do nabo-forrageiro no plantio direto**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 40, n. 02, p. 161-168, 2005.

GELDART, D.A.R. **Abrahamsen, Homogeneous fluidization of fine powders using various gases and pressures**, *Powder Technology* 19 (1978) 133–136.

KUNII, O. D. **Levenspiel, Fluidization Engineering**, Second ed., Butterworth Heinemann, London, 1991.

FAÉ GOMES, G.M.; PHILIPPSEN, C.G.; BARD, E. K.; SOUZA, G. **Dolomite Desulfurization Behavior on a Bubbling Fluidized Bed Pilot Plant for High Ash Coal**. *Brazilian Journal of Chemical Engineering (Impresso)*, v. 33, p. 319-332, 2015.

FURLANI, C. E. **Efeito do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno na cultura do feijoeiro** (*Phaseolus vulgaris* L.). 2000. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista. Botucatu – SP.

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, vol. 74, p 181, 1999.

GENEHR, G. A. **Caracterização da fluidização de biomassas de cascas de madeiras em leitos polidispersos.** 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Escola Politécnica, 2015.

GOMES, L.A. **Estudo Fluidodinâmico de Misturas Binárias de Biomassa Lignocelulósica e Areia em Leitos Dispersos.** 2017. 67 f. (Trabalho de conclusão de curso) Engenharia de Energia, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Novo Hamburgo, 2017.

GUNGOR, A. **Two-dimensional biomass combustion modeling of CFB.** Fuel, v. 87, n. 8-9, p. 1453–1468, 2008.

CUI, J.R.H.P. Grace, **Fluidization of biomass particles: a review of experimental multiphase flow aspects,** Chemical Engineering Science 62 (2007) 45–55.
IEA. **Clean coal centre.Fuels for biomass cofiring.** 2005. ISBN: 92-9029-418-3.

CLARKE, T. K.L. Pugsley, G.A. Hill, **Fluidization of moist sawdust in binary particle systems in a gas–solid fluidized bed,** Chemical Engineering Science 60 (2005) 6909–6918.

KAZAGIC A, Smajevic I. **Experimental investigation of ash behavior and emissions during combustion of Bosnian coal and biomass.** Energy 2007;32:2006–16.

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.

LINHARES, F. A. de. **Avaliação Fluidodinâmica e Processo de Co-combustão de Resíduo de Casca se Acácia Negra com Carvão Mineral em Planta Piloto de Leito Fluidizado Borbulhante.** 2016. 91 f. Dissertação (Mestrado) Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

LIU DC, Mi T, Shen BX, Feng B. **Reducing N2O emission by co-combustion of coal and biomass.** Energy Fuels 2002;16:525–6.

MOLCAN P, Lu G, Bris TL, Yan Y, Taupin B, Caillat S. **Characterisation of biomass and coal co-firing on a 3 MWth combustion test facility using flame imaging and gas/ash sampling techniques.** Fuel 2009;88:2328–34.

NARAYANAN KV, Natarajan E. **Experimental studies on cofiring of coal and biomass blends in India.** Renew Energy 2007; 32 : 2548–58.

NUSSBAUMER T. **Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction.** Energy Fuels 2003; 17:1510–21.

OCANHA, E. S.; ZINANI, F. F.; MAINARDI, H. K.; SANTOS, F. A, **Fluidization of binary mixtures of coal with sand and biomass in a bench scale reactor**. V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral (2017). Criciúma – SC.

PEDERSEN LS, Morgan DJ, van de Kamp WL, Christensen J, Jespersen P, DamJohansen K. Effects on SO_x and NO_x emissions by co-firing straw and pulverized coal. *Energy Fuels* 1997;11:439–46.

PENÃ, J. A. P. (2011). **Bubbling fluidized bed (BFB), when to use this technology In Industrial Fluidization South Africa** (pp. 1–12). Johannesburg, South Africa: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.

ROADMAP Tecnológico para produção, uso limpo e eficiente do carvão mineral nacional: 2012 a 2035. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2012.

SANTOS, F.; QUEIROZ, J. H.; COLODETTE, J.; SOUZA, C. J. **Produção de etanol celulósico a partir da cana-de-açúcar**. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Eds). *Bioenergia e Biorrefinaria: Cana-de-Açúcar e Espécies Florestais*. Viçosa: 2013. p 129-164.

SEYE, O. et al. **Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos**. Enc. Energ. Meio Rural, An. 3, 2003.

SILVA, J. B. da. **Hidrodinâmica da fluidização de biomassa e inertes em leito fluidizado**. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SILVA, V. S. da. **Caracterização Energética Dos Resíduos Gerados na Colheita e no Beneficiamento da Macieira para Fluidização em Leitos Polidispersos**. 2017. 64 f. (Trabalho de conclusão de curso) Engenharia de Energia, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Novo Hamburgo, 2017.

SPLIETHOFF H, Hein KRG. **Effect of co-combustion of biomass on emissions in pulverized fuel furnaces**. *Fuel Process Technol* 1998;54:189–205.

OLIVEIRA, C.R.T.J.P. Cardoso, C.H. Ataíde, **Bubbling fluidization of biomass and sand binary mixtures: Minimum fluidization velocity and particle segregation, Chemical Engineering and Processing**, 72 (2013) 113-121.

RAO, J.V.R.T.R. Bheemarasetti, **Minimum fluidization velocities of mixtures of biomass and sands**, *Energy* 26 (2001) 633–644.

TANNOUS, K.; LOURENÇO, J. B. **Fluid Dynamic and mixing Characteristics of Biomass Particles in Fluidized Beds**. In: TANNOUS, K. *Innovative Solutions in Fluid-Particle Systems and Renewable Energy Management*. IGI Global, 2015. Cap. 3, p. 54-91.

ZHANG, B.Y. Jin, W. Zhong, **Experimental investigation on mixing and segregation behavior of biomass particle in fluidized bed, Chemical Engineering and Processing** 48 (2009) 745–754.