

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

MARCELO GREGORY CUNHA

AVALIAÇÃO DA CO-COMBUSTÃO DE CARVÃO MINERAL COM SERRAGEM
DE EUCALIPTO EM LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE

São Leopoldo

2021

MARCELO GREGORY CUNHA

**AVALIAÇÃO DA CO-COMBUSTÃO DE CARVÃO MINERAL COM SERRAGEM
DE EUCALIPTO EM LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander

Coorientadora: Profa. Dra. Regina Célia Espinosa Modolo

São Leopoldo

2021

C972a

Cunha, Marcelo Gregory.

Avaliação da co-combustão de carvão mineral com serragem de eucalipto em leito fluidizado borbulhante / Marcelo Gregory Cunha. – 2021.

85 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2021.

“Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander

Coorientadora: Profª. Dra. Regina Célia Espinosa Modolo.”

1. Co-combustão. 2. Leito fluidizado borbulhante.
3. Biomassa. 4. Carvão mineral. I. Título.

CDU 621

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Amanda Schuster – CRB 10/2517)

MARCELO GREGORY CUNHA

**TÍTULO: AVALIAÇÃO DA CO-COMBUSTÃO DE CARVÃO MINERAL COM
SERRAGEM DE EUCALIPTO EM LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Aprovado em 30 de abril de 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes – UNISINOS

Profa. Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani – UNISINOS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira – UFRGS

AGRADECIMENTOS À CAPES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marcelo e Helena e minhas irmãs, Bárbara e Martina, por todo amor, carinho e apoio incondicional.

À minha namorada, Luâni, por estar junto durante toda a trajetória, comemorar os bons momentos e tornar os maus momentos menos difíceis.

À minha sogra, Vera, pelo carinho, apoio e amparo, minhas cunhadas Taimâni e Ana Livia e ao amigo Leonardo, por todo apoio, amizade e momentos de descontração sempre tão divertidos.

Ao PPGEM e à UNISINOS, pela oportunidade dada e por toda a infraestrutura oferecida.

À secretaria do PPGEM, em nome das funcionárias Anelise e Alice, pela presteza e profissionalismo ímpares.

Ao LCVMAT, em nome das laboratoristas Alini e Marluci, pelo fundamental apoio de sempre.

Ao laboratório de combustão da UFRGS, em nome do professor Fernando Pereira e dos colegas Rafael, Daniela e Juliana, por toda a infraestrutura cedida para realização do trabalho experimental.

Às empresas Sanchiz Fornos Industriais e Zomer Móveis pela assistência prestada e fornecimento da matéria prima.

A todos os professores do PPGEM, verdadeiros mestres do ensino.

Aos colegas do PPGEM, por todos os momentos, nem sempre fáceis, que juntos estivemos em prol de um mesmo objetivo.

Aos colegas Alisson, Guilherme e Marcos pelo apoio na realização dos experimentos e na elaboração dos artigos.

Aos professores da banca de qualificação, Flávia Zinani e Carlos Moraes pelos apontamentos fundamentais para aprimoração da pesquisa.

Ao meu orientador e à minha co-orientadora, professores Paulo Wander e Regina Modolo por todos os ensinamentos, revisões, elogios e puxões de orelha necessários para bom andamento do trabalho.

RESUMO

Estima-se que o carvão mineral permanecerá, pelos próximos anos, como o principal insumo para a produção de energia elétrica. Desta forma, há a necessidade em se estudar a sua co-combustão com biomassa, um combustível renovável e abundante, visando atenuar os impactos ambientais causados pelas emissões deste combustível fóssil. O presente estudo teve como objetivo analisar o efeito do teor de biomassa na co-combustão de biomassa e carvão mineral em um reator em leito fluidizado borbulhante em escala laboratorial. A biomassa utilizada é a serragem de eucalipto oriunda do Rio Grande do Sul e o carvão mineral é originário de uma jazida da Colômbia. Foram avaliados o comportamento fluidodinâmico a frio, as características físicas e térmicas das partículas, as condições operacionais do reator, bem como as emissões dos gases CO, CO₂, NO e SO₂. Foi possível observar que, a velocidade mínima de fluidização aumentou à medida que maiores razões de biomassa foram adicionadas à mistura. As análises químicas e térmicas do carvão mineral identificaram um baixo teor de cinzas (aproximadamente 7%) e um elevado poder calorífico (28,1 MJ/kg). As temperaturas no interior do leito se mantiveram estáveis, entre 800 e 900 °C, para todas as misturas e excessos de ar analisados. A adição de biomassa na mistura, nas proporções de 10 e 25% em massa, elevou a temperatura média do leito devido a rápida devolatilização do conteúdo volátil da biomassa verificados nos testes de TGA. Na região do *freeboard* foram observadas flutuações de temperatura, principalmente na mistura com 25% de biomassa. A adição de 10 e 25% de biomassa se mostrou favorável quanto às emissões de CO para a maioria das razões testadas. A adição de 10% de biomassa promoveu uma melhor eficiência do processo de combustão, sendo este fato observado com base na emissão de CO₂ mais próxima da ideal. Quanto aos gases NO e SO₂, o acréscimo de biomassa resultou em uma leve redução nas emissões quando comparada à queima singular do carvão mineral, o que pode ser explicado pela menor concentração dos elementos N e S presentes na biomassa.

Palavras-chave: Co-combustão. Leito Fluidizado Borbulhante. Biomassa. Carvão Mineral.

ABSTRACT

It is estimated that coal will remain, for the next few years, the main input to produce electricity. Thus, there is a need to study its co-combustion with biomass, a renewable and abundant fuel, to mitigate the environmental impacts caused by emissions of this fuel. This study aimed to analyze the effect of biomass content on the co-combustion of biomass and coal in a bubbling fluidized bed reactor in laboratory scale. The biomass used is eucalyptus sawdust from Rio Grande do Sul and the coal comes from a deposit in Colombia. The cold fluid dynamic behavior, the physical and thermal characteristics of the particles, the operational conditions of the reactor, as well as the emissions of CO, CO₂, NO and SO₂ gases were evaluated. It was possible to observe that the minimum fluidization velocity increased as higher biomass ratios were added to the mixture. Chemical and thermal analyzes of coal identified a low ash content (approximately 7%) and a high calorific value (28.1 MJ/kg). The temperatures inside the bed remained stable, between 800 and 900 °C, for all mixtures and excess air analyzed. The addition of biomass to the mixture, in proportions of 10 and 25% by mass, increased the average bed temperature due to the rapid devolatilization of the biomass volatile content verified in the TGA tests. In the freeboard region, temperature fluctuations were observed, mainly in the mixture with 25% of biomass. The addition of 10 and 25% of biomass proved favorable for CO emissions for most of the reasons tested. The addition of 10% biomass promoted a better efficiency of the combustion process, and this fact was observed based on the CO₂ emission closer to the ideal. As for the NO and SO₂ gases, the addition of biomass resulted in a slight reduction in emissions when compared to the singular burning of coal, which can be explained by the lower content of N and S elements present in the biomass.

Key-Words: Co-combustion. Bubbling Fluidized Bed. Biomass. Coal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Geração de eletricidade por fonte no mundo.	16
Figura 1-2 - Geração termelétrica brasileira em 2018.	17
Figura 2-1 - Etapas da fluidização.	23
Figura 2-2 - Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás.....	25
Figura 2-3 - Curvas características de fluidização e de defluidização.....	28
Figura 2-4 - Classificação das partículas por Geldart.....	29
Figura 2-5 - Círculos teóricos para determinação da esfericidade de partícula irregular.	33
Figura 2-6 - Zona de eficiência e produtos da combustão	36
Figura 2-7 - Mecanismo de combustão de uma partícula sólida.	38
Figura 3-1 - Etapas da metodologia.....	48
Figura 3-2 - Amostras da serragem de eucalipto (a) e do carvão mineral (b) utilizados na pesquisa.	49
Figura 3-3 - Característica física dos materiais do leito: (a) areia, (b) carvão mineral, (c) biomassa.	50
Figura 3-4 - Termobalança de precisão NETZSCH STA 409PC/PG.....	51
Figura 3-5 - Bancada de fluidização.....	52
Figura 3-6 - Combustor em leito fluidizado borbulhante. 1- pré-aquecedor de ar, 2- câmara plena, 3- placa distribuidora, 4- câmara de combustão, 5- isolamento, 6 – alimentador, 7 – silo, 8 – termopares, 9 – tomada de pressão, 10 – forno elétrico, 11 – ciclone.	56
Figura 3-7 - Analisador de gases contínuo SIEMENS Ultramat 23.....	57
Figura 3-8 - Analisador de gases portátil ECIL Chemist 500.	58
Figura 3-9 - Curva de calibração do alimentador para a mistura C90B10.....	59
Figura 3-10 - Misturas utilizadas nos testes de co-combustão: (a) C100B0 (b) C90B10 (c) C75B25.....	60
Figura 4-1 - Decomposição termogravimétrica (TGA) da biomassa de eucalipto e do carvão mineral de Pecém.....	65
Figura 4-2 - Decomposição termogravimétrica (TGA) e respectiva derivada (DTG) da curva da biomassa de eucalipto e do carvão mineral de Pecém.	66
Figura 4-3 - Curvas de defluidização para as misturas: (a) C0B100 e inerte; (b) C100B0 e inerte; (c) C75B25 e inerte; (d) C50B50 e inerte; (e) C25B75 e inerte.....	68
Figura 4-4 - Segregação de biomassa na superfície do leito (Mistura 15).....	69

Figura 4-5 - Velocidade mínima de fluidização em função da concentração mássica de cada mistura.....	69
Figura 4-6 - Temperatura do leito em função do excesso de ar para as misturas estudadas.	71
Figura 4-7 - Perfil de temperatura ao longo do tempo. (C100B0, $\lambda = 2, 3 U_{mf}$).....	72
Figura 4-8 - Perfil de temperatura ao longo do tempo. (C90B10, $\lambda = 2, 3 U_{mf}$).....	73
Figura 4-9 - Perfil de temperatura ao longo do tempo. (C75B25, $\lambda = 2, 3 U_{mf}$).....	73
Figura 4-10 - Concentração de CO em função do excesso de ar ($3 U_{mf}$, 6% de O ₂).....	74
Figura 4-11 - Concentração de CO ₂ em função do excesso de ar ($3 U_{mf}$, 6% de O ₂).	75
Figura 4-12 - Concentração de NO em função do excesso de ar ($3 U_{mf}$, 6% de O ₂).	76
Figura 4-13 - Concentração de SO ₂ em função do excesso de ar ($3 U_{mf}$, 6% de O ₂).....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Propriedades típicas dos grupos Geldart de partículas.....	30
Tabela 2-2 - Limites de emissões para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de derivados da madeira (Resolução N°436/2011 CONAMA).....	41
Tabela 2-3 - Limites de emissões a partir da combustão externa de carvão mineral e assemelhados (Diretriz Técnica N°01/2018 FEPAM).....	42
Tabela 3-1 - Análise elementar da biomassa de eucalipto e do carvão mineral.....	51
Tabela 3-2 - Percentual em volume e em massa das misturas em relação ao total do leito.....	53
Tabela 3-3 - Matriz de testes do combustor.	60
Tabela 4-1 - Propriedades físicas dos materiais.	62
Tabela 4-2 - Resultados de análise imediata, análise elementar e poder calorífico dos combustíveis	63
Tabela 4-3 - Velocidade mínima de fluidização das misturas.....	67
Tabela 4-4 - Perda ao fogo das amostras de material retido no ciclone.....	78

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEN	Balanco Energético Nacional
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler
IEA	Agência Internacional de Energia
ISO	Organização Internacional de Normalização
LASID	Laboratório de Siderurgia da UFRGS
LC	Laboratório de Combustão da UFRGS
LCVMAT	Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais da UNISINOS
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

LISTA DE SÍMBOLOS

(A/C)	Razão ar-combustível [-]
A	Área interna da seção transversal da coluna de fluidização [m ²]
Ar	Número de Arquimedes [-]
b	Largura da partícula [m]
C_M	Concentração do poluente medida na amostragem [%]
C_R	Concentração do poluente na condição de referência [%]
d_{cc}	Círculo teórico circunscrito [m]
d_{ci}	Círculo teórico inscrito [m]
d_p	Diâmetro da partícula [m]
d_{pi}	Diâmetro de abertura da peneira "i" [m]
$\bar{d}_{pi}$	Diâmetro médio entre as peneiras [m]
d_{pi+1}	Diâmetro de abertura da peneira posterior [m]
d_s	Diâmetro de Sauter [m]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
l	Comprimento da partícula [m]
L	Altura do leito fixo [m]
L_{mf}	Altura do leito na mínima fluidização [m]
m_a	Massa de ar [kg]
m_c	Massa de combustível [kg]
$\dot{m}_c$	Vazão mássica de combustível [kg/s]
m_p	Massa da partícula [kg]
O_M	Teor de oxigênio medido na amostragem [%]
O_R	Teor de oxigênio na condição de referência [%]
Q_c	Taxa de calor liberada na combustão [W]
R_A	Razão de Aspecto [-]
Re_{mf}	Número de Reynolds na mínima fluidização [-]
U_0	Velocidade superficial do gás [m/s]
U_{mf}	Velocidade mínima de fluidização [m/s]
V_p	Volume da partícula [m ³]

V_{ps}	Volume da partícula solta [m ³]
x_{pi}	Fração mássica retida em cada peneira "i" [-]
ε	Porosidade do leito [-]
ε_m	Porosidade do leito fixo [-]
ε_{mf}	Porosidade do leito na mínima fluidização [-]
ρ_b	Massa específica de carga [kg/m ³]
ρ_g	Massa específica do gás [kg/m ³]
ρ_p	Massa específica real [kg/m ³]
ρ_s	Massa específica real do sólido [kg/m ³]
ϕ_s	Esfericidade do sólido [-]
Δp	Queda de pressão no leito [kPa]
λ	Coeficiente de excesso de ar [-]
μ	Viscosidade absoluta do gás [Ns/m ²]

SUMÁRIO

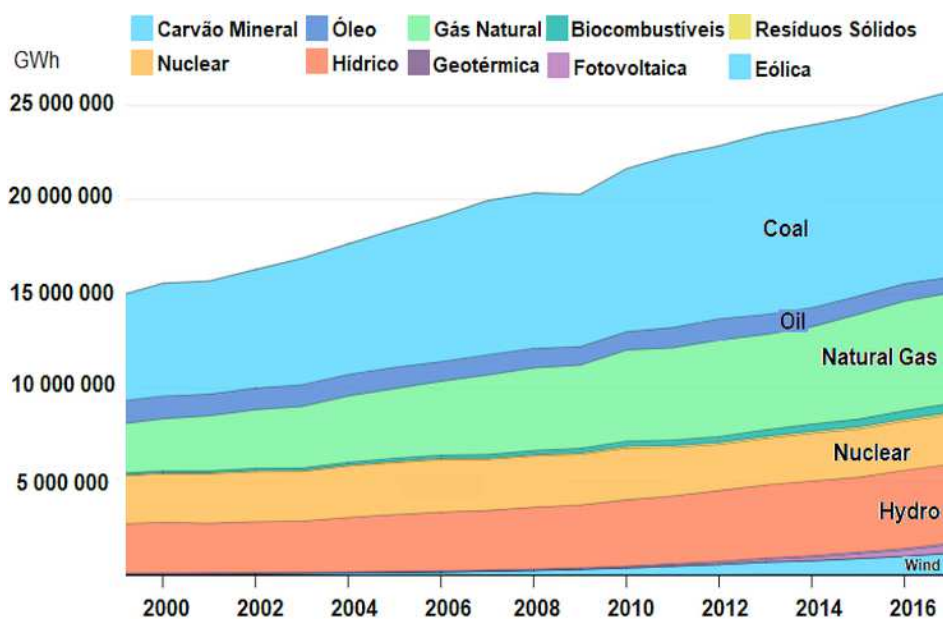
1 INTRODUÇÃO	16
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo Geral.....	19
1.2.2 Objetivos Específicos	19
1.3 Justificativa	20
1.4 Estrutura da Pesquisa	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Fluidodinâmica em Leitos Fluidizados.....	22
2.1.1 Regimes de Fluidização.....	22
2.1.2 Vantagens do Uso de Leitos Fluidizados	24
2.1.3 Queda de Pressão no Leito	24
2.1.4 Velocidade Mínima de Fluidização.....	26
2.1.5 Determinação da Velocidade Mínima de Fluidização	28
2.1.6 Classificação de Geldart para as Partículas	29
2.2 Caracterização Física das Partículas.....	31
2.2.1 Granulometria	31
2.2.2 Massa Específica Real	31
2.2.3 Massa Específica de Carga	32
2.2.4 Esfericidade	32
2.2.5 Razão de aspecto	33
2.3 Combustão.....	34
2.3.1 Estequiometria da Combustão e Excesso de Ar	34
2.3.2 Eficiência da Combustão	36
2.3.3 Combustão de Combustíveis Sólidos	37
2.3.3.1 Aquecimento e Secagem.....	38
2.3.3.2 Pirólise ou Devolatilização	38
2.3.3.3 Combustão do Char e dos Voláteis	39
2.3.4 Emissões Atmosféricas.....	39
2.3.4.1 Legislação Ambiental Para Emissões de Poluentes Atmosféricos	41
2.4 Propriedades dos Combustíveis Sólidos	42
2.4.1 Composição Elementar.....	43
2.4.2 Composição Imediata	43

2.4.3 Poder Calorífico	44
2.5 Co-Combustão.....	44
2.6 Combustores em Leitos Fluidizado	45
2.6.1 Vantagens dos Combustores em Leito Fluidizado.....	45
2.6.2 Co-Combustão em Leitos Fluidizados	45
3 METODOLOGIA	48
3.1 Materiais.....	49
3.1.1 Caracterização Física dos Materiais.....	49
3.1.2 Caracterização Química e Térmica dos Combustíveis	50
3.2 Bancada de Fluidização	52
3.3 Testes de Fluidização a Frio.....	53
3.3.1 Obtenção das Curvas de Fluidização e Defluidização	54
3.4 Combustor em Leito Fluidizado Borbulhante	54
3.5 Sistema de Análise dos Gases de Combustão	57
3.5 Testes de Co-combustão.....	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1 Caracterização Física dos Materiais.....	62
4.2 Análise Imediata, Análise Elementar e Poder Calorífico	63
4.3 Análise Termogravimétrica	64
4.4 Fluidização a Frio das Misturas	66
4.5 Condições de Operação do Combustor	70
4.6 Emissões.....	74
4.7 Caracterização das Cinzas por Perda ao Fogo.....	77
5 CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

O carvão mineral representa a segunda maior fonte de energia primária fornecida no mundo. E é a maior fonte global de geração de eletricidade até o ano de 2017, conforme Figura 1.1 (IEA,2020). Isso ocorre devido a três fatores principais: abundância das reservas, localização geográfica das reservas, baixos custos e preços estáveis em relação a outros combustíveis. Embora haja um grande avanço da participação de fontes renováveis na matriz energética mundial, estima-se que o carvão ainda permanecerá pelos próximos anos como o principal insumo para a produção de energia elétrica. Desta forma, há a necessidade em se estudar a sua combustão visando a atender os seguintes requisitos: melhorar a eficiência de conversão, reduzir os impactos ambientais de suas emissões e aumentar sua competitividade comercial (ANEEL, 2008).

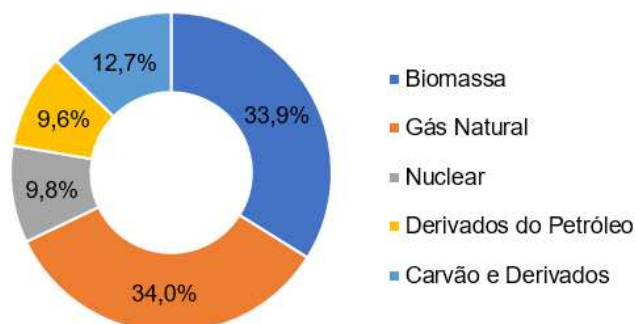
Figura 1-1 - Geração de eletricidade por fonte no mundo.



Fonte: Adaptado de IEA (2020).

Dentre as fontes de energias renováveis, suficientemente consolidadas para serem empregadas comercialmente, somente a biomassa possui a flexibilidade de suprir a demanda de combustível tanto para a produção de energia elétrica quanto para o setor de transportes. No Brasil, a participação de biomassas na geração termelétrica foi de 33,9%, em 2018, totalizando 52.267 GWh produzidos, atrás apenas do gás natural, conforme a Figura 1.2 (BEN,2019).

Figura 1-2 - Geração termelétrica brasileira em 2018.



Fonte: Adaptado de BEN (2019).

A co-combustão de biomassa e carvão mineral em caldeiras a carvão convencionais pode ser uma opção viável para a utilização de biomassa na geração de energia ou calor. A co-combustão faz uso da ampla infraestrutura associada aos sistemas de energia baseados em combustíveis fósseis existentes e requer apenas um investimento de capital adicional relativamente modesto. Na maioria dos países, a co-combustão de biomassa e carvão é uma das tecnologias mais econômicas disponíveis para fornecer reduções significativas de gases responsáveis pelo efeito estufa, como o CO₂. (VAN LOO e KOPPEJAN, 2008). Isto ocorre devido a um balanço nulo de emissões, pois o CO₂ que é liberado na atmosfera durante a combustão da biomassa corresponde ao mesmo gás que foi absorvido pela planta durante o processo de fotossíntese. Além disso, outras vantagens podem ser atreladas ao uso da biomassa como as baixas emissões de SO_x e NO_x devido à baixa ou nula presença de elementos como nitrogênio e enxofre em sua composição. Outras vantagens seriam os benefícios sociais e ambientais devido ao aproveitamento dos resíduos, promovendo incentivo a atividade econômica em zonas rurais. Ainda, a co-combustão pode mitigar alguns problemas trazidos pela combustão independente de biomassa que, em alguns casos, pode inviabilizar seu uso.

A utilização de reatores em leito fluidizado tem se mostrado favorável para aplicações em processos de co-combustão. Isso se deve ao fato de que esta tecnologia apresenta algumas vantagens em relação aos outros tipos de processos de combustão, tais como elevadas taxas de transferência de calor, contato gás-sólido favorável, temperaturas homogêneas no leito e a possibilidade de emprego de partículas com propriedades variadas. (LOURENÇO e TANNOS, 2015).

Conforme Xue et al. (2020), durante a conversão térmica da biomassa, podem ocorrer fenômenos como a fusão das cinzas ou *slagging* e incrustações ou *fouling* devido à presença de metais alcalinos e alcalinos-terrosos como potássio (K) e cloro (Cl), por exemplo. De acordo

com Bartels et al. (2008), a aglomeração é o maior problema operacional. Usualmente, a conversão do combustível sólido é realizada com a areia e cinzas como material do leito. Componentes inorgânicos alcalinos do combustível, principalmente potássio (K) e sódio (Na), combinados com a sílica presente na areia, podem ser a causa da aglomeração devido a formação de silicatos com baixo ponto de fusão. O conteúdo deste material inorgânico crítico pode variar muito entre os combustíveis, especialmente no caso de certos tipos de biomassa e de alguns carvões de baixo grau de carbonificação ou *rank*, em que este conteúdo é geralmente bastante alto. Como consequência deste fenômeno, as partículas de areia tornam-se revestidas por uma camada adesiva. Tais partículas com a superfície aderente crescem em aglomerados maiores após colidirem com partículas que possuem esta mesma característica. Se o processo não for identificado logo no início, ele se propaga, causando a desfluidização parcial ou total do reator.

Conforme Paudel e Feng 2013, partículas de biomassa apresentam dificuldade no processo de fluidização devido a sua forma, tamanho e densidade peculiar. Para melhorar a fluidização e o processo de transferência de calor no reator, materiais inertes (areia, óxido de alumínio e cinzas CFB) são utilizados. Assim, a compreensão da fluidodinâmica de misturas de biomassas, carvão mineral e inertes é parâmetro essencial a ser considerado em projeto e operação deste tipo de equipamento.

Alguns autores estudaram a co-combustão de diferentes biomassas e carvão mineral em reatores em leito fluidizado, avaliando parâmetros operacionais, tais como: fluidodinâmica do leito, características da combustão, fenômenos de segregação e aglomeração, emissões atmosféricas e caracterização das cinzas. (LINHARES, 2016; BIANCHI, 2018, TARELHO, NEVES & MATOS, 2011, XUE, ZHONG & LAI, 2020).

Linhares (2016) estudou as variações no processo fluidodinâmico de misturas de carvão mineral, casca de acácia e areia em um reator em leito fluidizado de bancada e após, avaliou as emissões oriundas da co-combustão destes materiais em uma planta piloto em leito fluidizado. Wander et al. (2020) estudaram os efeitos, nos gases de combustão, da utilização da biomassa de pinus em co-combustão com carvão mineral brasileiro em um reator em leito fluidizado borbulhante de bancada. Os autores obtiveram resultados positivos quanto às emissões avaliadas.

Conforme Sahu et al. (2014), o uso de biomassa em unidades já instaladas e que foram projetadas para combustão de carvão é relativamente baixo e não ultrapassam 10% em massa na alimentação destes sistemas. Entretanto, pesquisas recentes 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 carvão mineral encontrado no Rio Grande do Sul representa 89% do carvão mineral encontrado no Brasil para a produção de termoeletricidade e, aproximadamente, 38% deste carvão é encontrado na região de Candiota. Este carvão, embora abundante, possui baixo poder energético e um elevado teor de impurezas, com o *rank* caracterizado como sub-betuminoso (ANEEL, 2008). Na atualidade, a segunda principal fonte de energia no Brasil é proveniente da biomassa. Na utilização das energias renováveis, o Brasil é um dos poucos países no mundo com potencial para substituir as energias fósseis. A produtividade bem como as características de sua madeira torna o gênero *Eucalyptus* uma das melhores alternativas para a produção de biomassa que é destinada à geração de energia. (CORTEZ, LORA & GOMEZ, 2008). Hoffmann et al. (2012) avaliaram o uso da co-combustão de biomassas em usinas a carvão no sul do Brasil. Os autores concluíram que o uso da madeira de eucalipto em um processo de co-combustão com o carvão mineral sul brasileiro apresenta um elevado potencial técnico-econômico.

Considerando a elevada disponibilidade de resíduos da biomassa de eucalipto e de carvão mineral no Brasil, neste trabalho foi avaliada a influência do percentual de misturas binárias e ternárias de biomassa, carvão mineral e inerte na fluidodinâmica de um leito fluidizado em escala laboratorial, por meio da observação e relato do comportamento do leito e após foi avaliada a co-combustão destes combustíveis em um reator em leito fluidizado borbulhante tendo como objetivo analisar as vantagens do processo em relação a combustão simples do carvão mineral.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho foi avaliar o efeito do teor de biomassa na co-combustão com carvão mineral em um reator em leito fluidizado borbulhante de escala laboratorial.

1.2.2 Objetivos Específicos

São os objetivos específicos:

- a) Avaliar o comportamento fluidodinâmico de misturas de carvão e biomassa em um reator em leito fluidizado à frio;
- b) Analisar a influência da biomassa quanto às emissões dos gases CO, CO₂, NO e SO₂; e
- c) Analisar a influência da biomassa na estabilidade operacional do reator.

1.3 Justificativa

A co-combustão do carvão mineral e de diversos tipos de biomassa, em reatores em leitos fluidizados, tem-se apresentado bastante favorável em prol da redução de emissões de gases causadores de efeito estufa, e pode ser também utilizada para atenuar os impactos ambientais negativos associados a mineração do carvão mineral.

O estudo do comportamento das misturas de carvão mineral e biomassa em leito fluidizado é importante para minimizar as dificuldades operacionais encontradas e para determinar as condições que permitem a obtenção de maiores eficiências de combustão, reduzindo as emissões indesejadas.

1.4 Estrutura da Pesquisa

O capítulo 1 da dissertação apresenta a introdução ao assunto, o objetivo geral, os objetivos específicos bem como a justificativa para a realização da pesquisa.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados ao comportamento fluidodinâmico em leitos fluidizados, as principais características das partículas sólidas que influenciam na fluidização. Também descreve como ocorre a combustão de sólidos, as propriedades dos combustíveis que afetam a combustão e a emissão de gases e particulados. Descreve ainda o processo de co-combustão em leitos fluidizados, suas principais características e vantagens.

O capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados para caracterização dos sólidos, a descrição dos aparatos experimentais bem como a metodologia de execução dos testes fluidodinâmicos a frio e de combustão no reator.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos após análise dos dados dos testes de fluidização e de co-combustão e a discussão dos mesmos fundamentada com os resultados verificados na literatura.

Por fim, o capítulo 5 traz as conclusões obtidas após o desenvolvimento da pesquisa seguida pelo referencial teórico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda os principais temas relacionados à fluidodinâmica em leitos fluidizados, caracterização das partículas sólidas que compõem o leito, o processo de combustão, como ele ocorre em combustíveis sólidos, suas propriedades térmicas e físico-químicas e as emissões geradas. Faz também uma abordagem geral sobre o processo de co-combustão em leito fluidizado indicando as principais características e vantagens deste processo.

2.1 Fluidodinâmica em Leitos Fluidizados

A diferença básica entre um combustor ou gaseificador em leito fluidizado e uma caldeira de combustão pulverizada ou de combustão sobre grelhas está na fluidodinâmica do movimento gás-sólido no interior destas fornalhas ou reatores. A maioria de suas características ambientais e operacionais são resultados diretos desta interação. Por esta razão, a performance de uma caldeira ou gaseificador em leito fluidizado cai significativamente quando a operação desvia do regime de fluidização projetado. Assim, é muito importante ter um bom entendimento do movimento gás-sólido no interior do reator ou fornalha de uma unidade em leito fluidizado (BASU, 2006).

2.1.1 Regimes de Fluidização

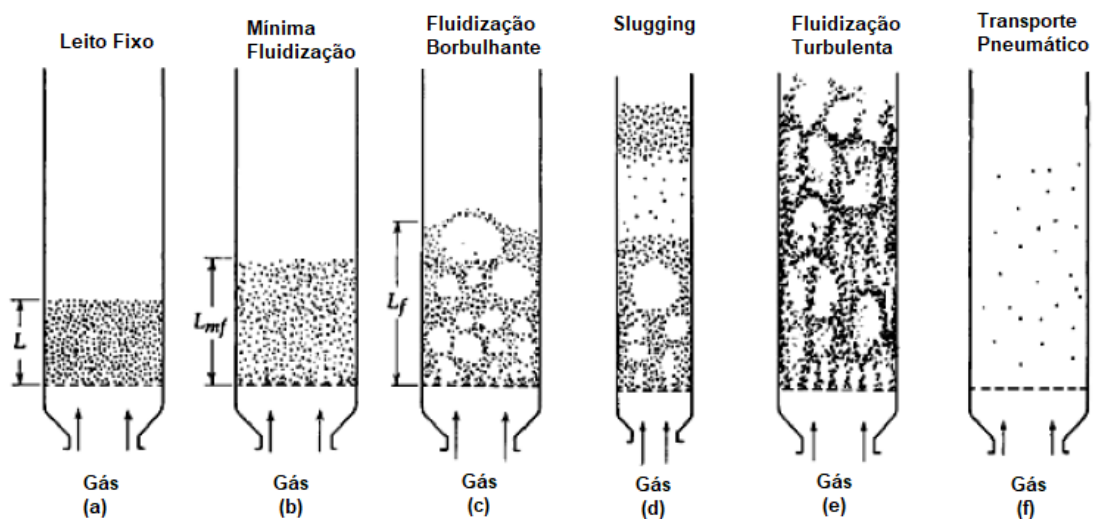
A fluidização é a operação pela qual as partículas sólidas são transformadas em um estado fluido por meio de suspensão em um gás ou líquido. Este método de contato tem algumas características incomuns, que são bem utilizadas pela engenharia (KUNII E LEVENSPIEL, 1991).

Quando um fluxo de gás é introduzido sob um leito de partículas sólidas, ele irá entrar no leito através dos espaços vazios entre as partículas. Nas velocidades mais baixas do gás, o arrasto aerodinâmico sobre cada partícula também será baixo. Nesta condição tem-se um *leito fixo*, conforme Figura 2.1(a). Aumentando a velocidade do gás, a força de fricção entre as partículas e o fluido começará a interagir com a força peso das partículas, fazendo com que o leito se expanda à medida que as partículas sólidas se afastam umas das outras, tendo-se assim um *leito expandido*. (KUNII E LEVENSPIEL, 1991).

Continuando com o aumento da velocidade, esta irá atingir um valor crítico, no qual as forças de fricção entre as partículas e o fluido serão exatamente iguais ao peso das partículas, fazendo com que as partículas fiquem suspensas dentro do fluido. A queda de pressão, através de qualquer seção no leito, torna-se igual ao peso do fluido e das partículas nesta seção. Para este valor crítico, o leito é dito ser fluidizado e é denominado como *leito fluidizado incipiente* ou *leito na mínima fluidização*, conforme a Figura 2.1(b). (KUNII E LEVENSPIEL, 1991).

Na mínima fluidização, sistemas fluidizados a gás podem apresentar fluidização borbulhante ou não borbulhante. Entretanto, na medida em que a vazão aumenta o sistema tende a se tornar borbulhante. A este leito dá-se o nome de *leito fluidizado agregativo*, *leito fluidizado heterogêneo* ou *leito fluidizado borbulhante*, conforme Figura 2.1(c). (RHODES, 2008).

Figura 2-1 - Etapas da fluidização.



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991).

A Figura 2.1(d) representa o leito com comportamento do tipo *slugging* ou *leito pistonado*. Tal comportamento ocorre quando as bolhas de gás coalescem e aumentam conforme sua ascensão no leito. Segundo Rhodes (2008), o slugging ocasiona grandes flutuações de pressão e por isso deve ser evitado em grandes unidades pois pode causar vibração da planta.

A transição da fluidização borbulhante para a turbulenta começa quando, devido ao aumento da velocidade de fluidização na fase de emulsão, as bolhas coalescem transformando-se em bolhas e vazios de diferentes formas e tamanhos, caracterizando um *leito fluidizado turbulento*, conforme ilustra a Figura 2.1(e) (OKA, 2004).

2.1.2 Vantagens do Uso de Leitos Fluidizados

Em leitos fluidizados, o contato das partículas sólidas com o meio de fluidização é muito maior quando comparado com leitos fixos. Este comportamento em câmaras de combustão com leito fluidizado, por exemplo, possibilita um bom transporte térmico dentro do sistema e uma boa transferência de calor entre o leito e seu recipiente.

De acordo com Kunii e Levenspiel, (1991), são citadas algumas vantagens quando da utilização da tecnologia de leito fluidizado em processos industriais. Sendo elas:

- a) O escoamento das partículas, como de um fluido uniforme, permite operações controladas continuamente e automaticamente com fácil manuseio;
- b) A fácil mistura dos sólidos conduz à condições isotérmicas no leito;
- c) Alta transferência de calor e massa entre gás e partículas sólidas;
- d) A taxa de transferência de calor entre o leito fluidizado e um objeto imerso é alta, sendo necessárias pequenas áreas de troca térmica para os trocadores de calor que utilizam o leito fluidizado.

Também, algumas desvantagens do processo são enumeradas:

- a) Sólidos friáveis podem ser pulverizados e arrastados pelo gás sendo necessário reciclá-los;
- b) Desgaste de tubos e colunas pela abrasão das partículas;
- c) Operações não catalíticas a altas temperaturas, aglomeração e sinterização de partículas finas, podem requerer a diminuição da temperatura, muitas vezes reduzindo consideravelmente a taxa de reação.
- d) A rápida mistura dos sólidos no leito conduz a tempo de residência distintos, podendo comprometer a homogeneidade do produto, reduzindo a eficiência e performance.

2.1.3 Queda de Pressão no Leito

De acordo com Kunii e Levenspiel, (1991), a queda de pressão em um leito em fluidização incipiente, pode ser descrita pela “Eq. (2.1)”.

$$\Delta p \cdot A = (A \cdot L_{mf})(1 - \varepsilon_{mf})[(\rho_s - \rho_g)g] \quad (2.1)$$

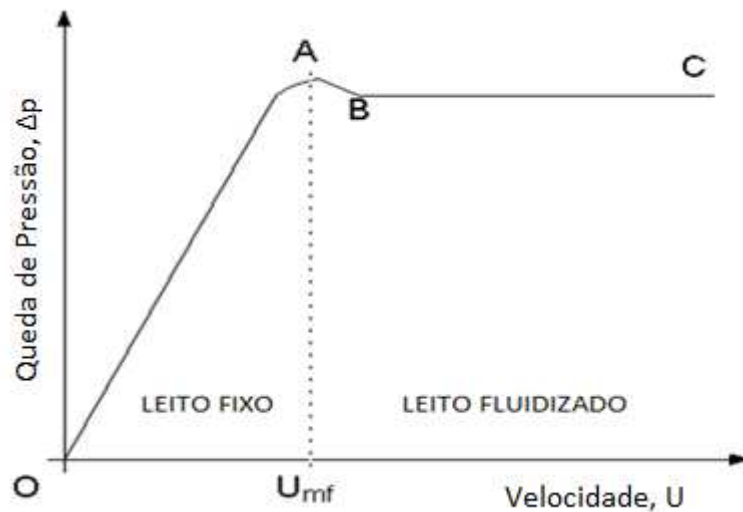
Onde Δp é a queda de pressão no leito, A é a área da seção transversal do leito, L_{mf} é a altura do leito na mínima fluidização, ε_{mf} é a porosidade do leito na mínima fluidização, ρ_s é a massa específica do sólido, ρ_g é a massa específica do gás e g é a aceleração da gravidade.

Rearranjando a “Eq. (2.1)”, encontra-se a queda de pressão através do leito, nas condições de mínima fluidização, conforme a “Eq. (2.2)”.

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.2)$$

Um gráfico típico da queda de pressão no leito, em função do aumento da velocidade superficial do fluido através do leito, pode ser interpretado por meio da curva fluidodinâmica, ilustrada na Figura 2.2. Onde U_{mf} representa a velocidade mínima de fluidização.

Figura 2-2 - Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás



Fonte: Adaptado de Rhodes (2008).

Na região da linha reta OA há um leito fixo. Nessa região, as partículas sólidas não se movimentam entre si e sua separação é constante. A queda de pressão aumenta com o aumento da velocidade, podendo ser descrita pela equação de Ergun ou “Eq. (2.3)”.

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3} \frac{\mu U_0}{(\phi_s d_p)^2} + 1,75 \frac{1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_m^3} \frac{\rho_g U_0^2}{\phi_s d_p} \quad (2.3)$$

Onde L é a altura do leito fixo, ε_m é porosidade do leito fixo, U_0 é a velocidade superficial do gás através do leito, ϕ_s é a esfericidade do sólido, d_p é o diâmetro da partícula e μ é a viscosidade absoluta do gás.

A região BC é a região de fluidização, onde aplica-se a “Eq. (2.2)”. Entretanto, no ponto A, nota-se que a queda de pressão se eleva um pouco acima do valor previsto pela “Eq. (2.2)”. De acordo com Rhodes (2008), este aumento é mais acentuado em leitos menores, em partículas que foram compactadas antes do teste e está associado com a força adicional que será necessária para vencer as forças de atração entre as partículas, entre as partículas e a parede e entre o leito e o distribuidor. A partir de C, as partículas são arrastadas pelo fluido para fora do leito iniciando-se o transporte pneumático.

2.1.4 Velocidade Mínima de Fluidização

A velocidade superficial do gás na qual o leito compactado torna-se fluidizado é conhecida como velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), também por vezes referida como velocidade de fluidização incipiente. Esta velocidade aumenta com o tamanho e densidade das partículas e é afetada pelas propriedades dos fluidos (RHODES, 2008). É possível de se chegar a uma expressão para a velocidade mínima de fluidização, combinando a equação para a queda de pressão no leito fluidizado, “Eq. (2.2)”, com a equação para a queda de pressão em leito fixo ou compactado, “Eq. (2.3)”, resultando na “Eq. (2.4)”.

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{dp^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2.4)$$

Quando a esfericidade da partícula (ϕ_s) e a porosidade do leito na fluidização (ε_{mf}) são conhecidas, para um leito de partículas pequenas, e, para baixo Número de Reynolds ($Re_{mf} < 20$), onde as perdas por atrito viscoso são predominantes, para se determinar a velocidade mínima de fluidização, utiliza-se a “Eq. (2.5)”.

$$U_{mf} = \left(\frac{(\phi_s d_p)^2}{150} \right) \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\mu} \right) \left(\frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) g \quad (2.5)$$

Para partículas maiores ($\pm 150 \mu m$) e para o número de Reynolds elevado ($Re_{mf} > 1000$), as perdas por energia cinética tornam-se importantes, então a velocidade mínima de fluidização é estabelecida, de acordo com a “Eq. (2.6)”.

$$U_{mf}^2 = \left(\frac{\phi_s d_p}{1,75} \right) \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \right) g \varepsilon_{mf}^3 \quad (2.6)$$

Quando ϕ_s e ε_{mf} não são conhecidas, como frequentemente ocorre na prática, Wen e Yu, 1966, encontraram as seguintes relações empíricas, de acordo com as “Eq. (2.7)” e “Eq. (2.8)”.

$$\frac{1}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \cong 14 \quad (2.7)$$

$$\frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \cong 11 \quad (2.8)$$

Então, combinadas as “Eq (2.7)” e “Eq (2.8)”, com a “Eq (2.4)”, obtêm-se a “Eq.(2.9)”.

$$Re_{mf} = [(33,7)^2 + 0,0408 Ar]^{\frac{1}{2}} - 33,7 \quad (2.9)$$

Onde Ar é o número de Arquimedes, obtido pela “Eq. (2.10)”.

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2.10)$$

Substituindo-se na Eq (2.9), o número de Reynolds na mínima fluidização (Re_{mf}) e o número de Arquimedes (Ar), tem-se a “Eq. (2.11)”.

$$\frac{U_{mf} d_p \rho_g}{\mu} = \left[(33,7)^2 + 0,0408 \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{\frac{1}{2}} - 33,7 \quad (2.11)$$

Para pequenas partículas e para $Re_{mf} < 20$, segundo Kunii e Levenspiel, 1991, aplica-se a “Eq. (2.12)”.

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad (2.12)$$

Para partículas maiores e $Re_{mf} > 1000$, segundo os mesmos autores, utiliza-se a “Eq. (2.13)”.

$$U_{mf}^2 = \frac{d_p(\rho_s - \rho_g)g}{24,5\rho_g} \quad (2.13)$$

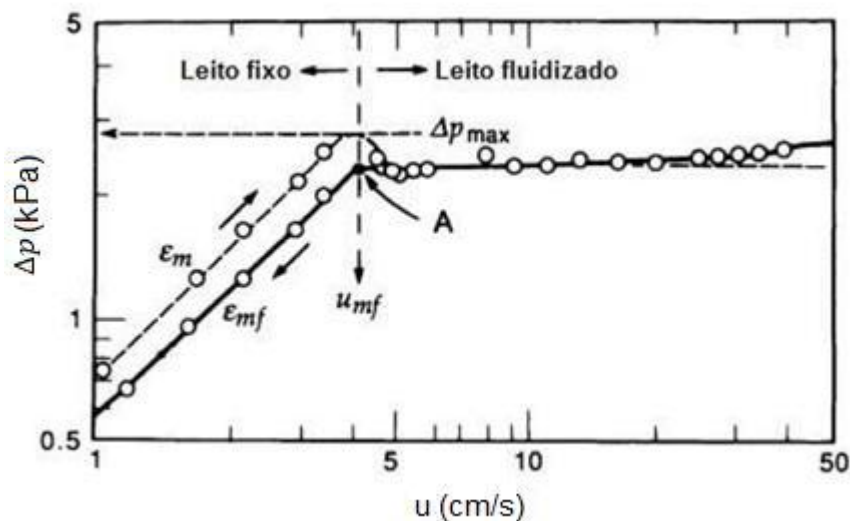
De acordo com Oka (2004), essas expressões simplificadas estimam a velocidade mínima de fluidização em termos de variáveis usualmente conhecidas para o gás e para as partículas. Para uma escala de Reynolds que varia de 0,001 a 4000 essas expressões dão previsões de velocidade mínima de fluidização com desvio padrão de $\pm 34\%$.

As “Eq. (2.5)” e “Eq. (2.6)” são usadas quando se tem as informações de esfericidade da partícula e porosidade do leito e, sendo possível utilizá-las, dão melhores previsões para cálculo de velocidade mínima de fluidização.

2.1.5 Determinação da Velocidade Mínima de Fluidização

Conforme Wen e Yu (1966) e Lourenço e Tannous (2015), a velocidade mínima de fluidização pode ser determinada pela intersecção entre uma reta ao longo da região de leito fixo com a linha de queda de pressão constante após a fluidização, conforme o ponto A da Figura 2.3.

Figura 2-3 - Curvas características de fluidização e de defluidização.



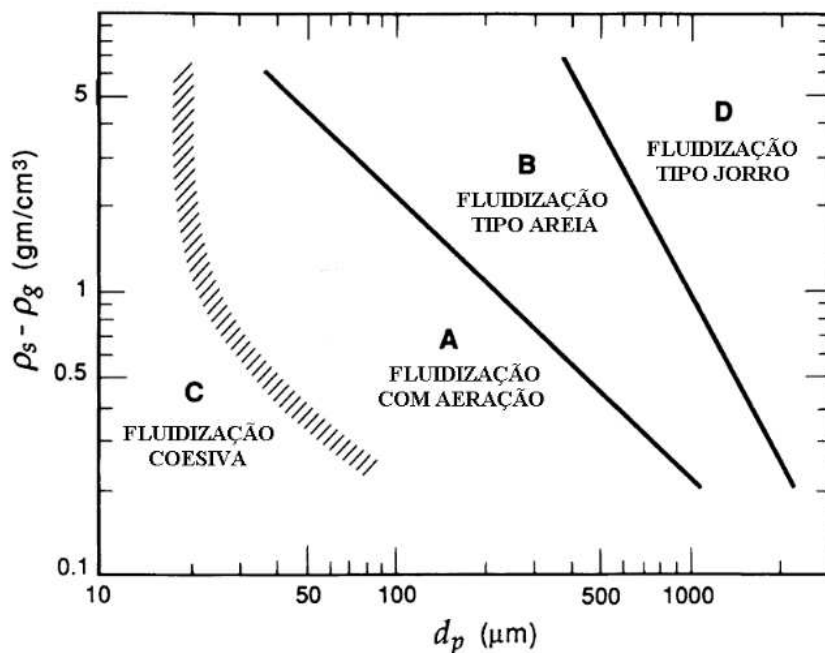
Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991).

De acordo com Lourenço e Tannous (2015), utiliza-se as curvas de defluidização por serem semelhantes entre si quando comparadas às curvas de fluidização, que estão suscetíveis ao arranjo inicial do leito, apresentando frequente variabilidade de comportamento.

2.1.6 Classificação de Geldart para as Partículas

Em 1973, Geldart classificou as partículas em quatro categorias de acordo com suas propriedades e condições ambientes, e esta classificação é usada amplamente em todos os campos da tecnologia de partículas sólidas. (RHODES, 2008). A Figura 2.4 mostra como as classificações dos grupos estão relacionadas de acordo com o tamanho de partícula e propriedades do gás.

Figura 2-4 - Classificação das partículas por Geldart.



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991).

Grupo A - Partículas que, quando fluidizados por ar, em condições ambientes, dão origem a uma região de fluidização não borbulhante que começa na velocidade mínima de fluidização, seguida por uma fluidização borbulhante conforme aumenta-se a velocidade superficial do gás;

Grupo B - Estes sólidos fluidizam bem com ação de borbulhamento vigoroso e as bolhas crescem muito. As bolhas formam-se tão logo a velocidade do gás atinge a velocidade mínima de fluidização;

Grupo C - Partículas muito finas e coesivas. A fluidização é difícil para estes sólidos pois as forças interpartículas são mais fortes que as forças de ação do gás;

Grupo D - Partículas grandes com características marcantes, formando jorros e *slugs* (bolhas grandes atingindo o diâmetro do leito).

É importante notar que, em temperaturas e pressões elevadas, as partículas podem aparecer em um grupo diferente daquele em que ela ocupa nas condições ambientes. Isto se deve ao efeito das propriedades do gás no agrupamento e pode resultar em consequências graves na medida em que o leito estiver em funcionamento.

De acordo com Rhodes, (2008), a Tabela 2.1, criada por Geldart, D., 1986, apresenta um resumo das propriedades típicas para os diferentes grupos Geldart de partículas.

Tabela 2-1 - Propriedades típicas dos grupos Geldart de partículas.

	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Características mais relevantes	Ideal para a fluidização; faixa de fluidização não-borbulhante	Início do Borbulhamento na velocidade mínima de fluidização	Coesivo; difícil de fluidizar	Sólidos grandes e grosseiros
Exemplos Típicos	Catalisador de Craqueamento	Areia de Construção	Farinha de Trigo Cimento	Xisto, carvão, grãos em geral
Expansão do Leito	Alta	Moderada	Baixa com presença de canais preferenciais;	Baixa
Taxa de aeração	Lenta, linear	Rápida	Inicialmente rápida em seguida exponencial	Rápida
Propriedades das Bolhas	Se dividem e coalescem continuamente; tamanho máximo de bolha	Sem limites de tamanho	Sem bolhas (somente canais preferenciais)	Sem limites de tamanho
Mistura de Sólidos	Alta	Moderada	Muito baixa	Baixa
Mistura gasosa (bolha)	Alta	Moderada	Muito baixa	Baixa
Jorro	Não	Somente leitos rasos	Não	Sim, mesmo em leitos profundos

Fonte: Adaptado de Rhodes (2008).

2.2 Caracterização Física das Partículas

A fluidodinâmica em leitos fluidizados é fortemente influenciada pelas características físicas das partículas sólidas que compõem o leito. Tais características como a granulometria, massa específica real, massa específica de carga, esfericidade, razão de aspecto bem como os métodos utilizados para caracterizá-las serão descritos a seguir.

2.2.1 Granulometria

Um conglomerado de partículas sólidas granulares polidispersas se caracteriza por apresentar basicamente várias classes de tamanhos de partículas. A determinação das características granulométricas ou de distribuição de tamanhos destes conglomerados comumente é realizado em laboratório. O resultado da análise de distribuição de tamanhos é a determinação da dimensão característica geralmente representada pelo seu diâmetro médio ou diâmetro de Sauter (d_s). (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008). O diâmetro médio de Sauter pode ser determinado por peneiramento das partículas, utilizando uma sequência de peneiras com abertura padronizada, podendo ser calculado pela “Eq. (2.14)”.

$$d_s = \frac{1}{\sum \frac{x_{pi}}{d_{pi}}} \quad (2.14)$$

Onde x_{pi} refere-se à fração mássica de material retida em cada peneira e $\bar{d}_{pi}$ o diâmetro médio entre as peneiras que é determinado pela “Eq. (2.15)”.

$$\bar{d}_{pi} = \frac{d_{pi} + d_{pi+1}}{2} \quad (2.15)$$

Onde d_{pi} representa o diâmetro de abertura de uma determinada peneira e d_{pi+1} o diâmetro de abertura de uma peneira posterior.

2.2.2 Massa Específica Real

Conforme Cremasco (2012), a massa específica real (ρ_p) é definida como a massa de uma certa partícula (m_p) dividida pelo volume ocupado pela mesma (V_p), sem considerar os espaços vazios entre as partículas, conforme “Eq. (2.16)”.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (2.16)$$

A massa específica real é comumente determinada pela técnica de picnometria gasosa. O picnômetro utilizado emprega gás hélio para preencher os espaços vazios entre as partículas do material cuja massa específica se deseja determinar.

2.2.3 Massa Específica de Carga

A massa específica de carga é a massa das partículas por unidade de volume do leito. A massa específica de carga é sempre menor que a massa específica real de uma partícula sólida, uma vez que o volume do leito considera o volume de vazios entre as partículas. Ela depende do tamanho, formato, estado de superfície, massa específica real e o grau de compactação das partículas (OKA,2004).

A massa específica de carga é determinada por meio da “Eq. (2.17)”.

$$\rho_b = \frac{m_p}{V_{ps}} \quad (2.17)$$

Onde V_{ps} representa o volume das partículas soltas, considerando os vazios e poros sem compactação.

A massa específica de carga também pode ser determinada em função da porosidade das partículas no leito (ε), conforme a “Eq. (2.18)”.

$$\rho_b = \rho_P(1 - \varepsilon) \quad (2.18)$$

Conforme Oka (2004), uma classificação aproximada dos sólidos particulados pode ser dada em função da massa específica de carga destes materiais. Sendo:

- Materiais leves: $\rho_b < 600 \text{ kg/m}^3$
- Materiais meio-pesados: $600 \text{ kg/m}^3 < \rho_b < 2000 \text{ kg/m}^3$
- Materiais pesados: $\rho_b > 2000 \text{ kg/m}^3$

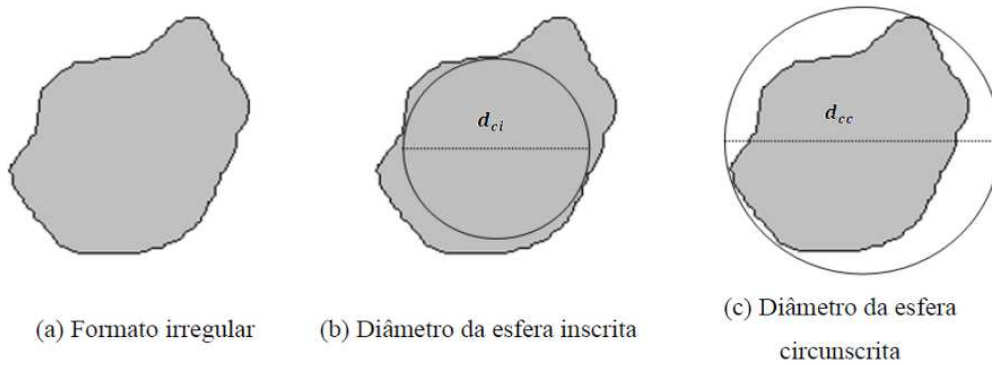
2.2.4 Esfericidade

A esfericidade (ϕ_s) é uma característica que indica o quanto a forma de uma partícula ou de um conglomerado de partículas se aproxima de uma esfera. Existem alguns métodos que

podem ser empregados para determinação da esfericidade. Segundo Peçanha e Massarani (1986) apud Lourenço (2012), a determinação da esfericidade pode ser realizada de forma simplificada através de medidas bidimensionais dos diâmetros de um círculo teórico inscrito (d_{ci}) e de outro círculo teórico circunscrito na partícula (d_{cc}). O círculo inscrito é o maior círculo que se encaixa dentro do limite da partícula. O círculo circunscrito é o menor que engloba toda a área da partícula, conforme a Figura 2.5. A esfericidade pode então ser determinada por meio da “Eq. (2.19)”.

$$\phi_s = \frac{d_{ci}}{d_{cc}} \quad (2.19)$$

Figura 2-5 - Círculos teóricos para determinação da esfericidade de partícula irregular.



Fonte: Lourenço (2012).

2.2.5 Razão de aspecto

A razão de aspecto R_A de uma partícula é dada pela relação entre a largura da partícula b e o seu comprimento, l , conforme a “Eq. (2.20)”, variando entre 0 e 1. Conforme Tannous et al. (2013) e Olatunde et al. (2016), as partículas resultantes de processos de moagem de biomassas geralmente apresentam R_A médio significativamente menor do que 1.

$$R_A = \frac{b}{l} \quad (2.20)$$

Michelotto (2018) propôs uma modificação na equação de Ergun substituindo a esfericidade da partícula pela razão de aspecto em uma fluidização do tipo jorro com partículas pertencentes ao grupo Geldart D. Os resultados encontrados para a velocidade mínima de

fluidização nesta nova correlação obtiveram uma variação de 15% quando comparados aos resultados experimentais.

2.3 Combustão

O processo de combustão é descrito como sendo a reação rápida entre o oxigênio e os constituintes de um combustível que gera calor e luz. (GARCIA, 2013).

De acordo com Lagemann (2016), em uma câmara de combustão podem ocorrer dois tipos de reação. As reações exotérmicas são reações onde ocorre a liberação de calor e podem ser exemplificadas pelas “Eq. (2.21)”, “Eq. (2.22)”, e “Eq. (2.23)”.



Tais reações ocorrem quando a quantidade de oxigênio for suficiente para a total oxidação de cada elemento do combustível.

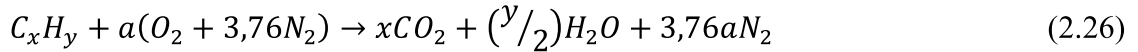
Por outro lado, as reações endotérmicas são reações onde ocorre a absorção de calor e podem ser exemplificadas pelas “Eq. (2.24)” e “Eq. (2.25)”.



A reação do nitrogênio ocorre no núcleo da chama que é uma região de alta temperatura e a redução de dióxido de carbono ocorre na superfície incandescente do carbono sob a falta de oxigênio.

2.3.1 Estequiometria da Combustão e Excesso de Ar

A quantidade estequiométrica de oxidante é simplesmente a quantidade necessária para queimar completamente certa quantidade de combustível. Para um combustível hidrocarboneto, C_xH_y , de acordo com Turns (2013), é expressa pela “Eq. (2.26)”.



Onde o coeficiente a pode ser expresso pela “Eq. (2.27)”.

$$a = x + y/4 \quad (2.27)$$

A composição simplificada do ar corresponde a 21% de O_2 e 79% de N_2 (por volume), ou seja, para cada mol de O_2 no ar existem 3,76 mols de N_2 .

A razão estequiométrica ar-combustível pode ser encontrada pela “Eq. (2.28)”.

$$(A/C)_{esteq} = (m_a/m_c)_{esteq} \quad (2.28)$$

Onde m_a é a massa de ar e m_c é a massa de combustível.

De acordo com Garcia (2013), a massa de ar necessária para a combustão estequiométrica é dada pela “Eq. (2.29)”.

$$m_{ar;esteq} = 11,53C + 34,56 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 4,32S + 2,46N \quad (2.29)$$

E o volume de ar necessário para a combustão estequiométrica é dado pela “Eq. (2.30)”.

$$V_{ar;esteq} = 8,85C + 26,65 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 3,33S + 1,9N \quad (2.30)$$

De acordo com Lagemann (2016), algumas variâncias são comuns em processos industriais, como demanda de cargas flutuantes, instabilidade na mistura dos reagentes, turbulência da chama, perdas de calor ao meio, requerem ajustes que muitas vezes se tornam impraticáveis.

A fim de proporcionar a combustão completa do combustível no interior da câmara de combustão é necessário o fornecimento de uma quantidade de ar superior à estequiométrica. Entretanto, um limite de excesso de ar deve ser estabelecido pois uma quantidade de ar muito acima deste limite, mesmo garantindo a combustão completa, causará ineficiência de combustão principalmente devido ao resfriamento da temperatura de combustão e aumento dos gases de escape. Por definição o coeficiente de excesso de ar é dado pela “Eq. (2.31)”.

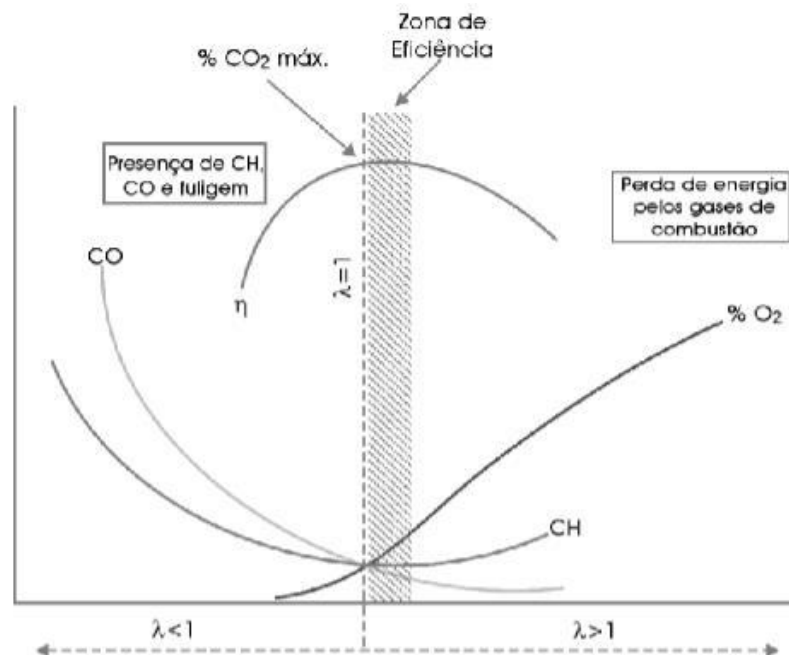
$$\lambda = \frac{(A/C)_{real}}{(A/C)_{esteq}} = \frac{m_{ar}}{m_{ar;esteq}} = \frac{V_{ar}}{V_{ar;esteq}} \quad (2.31)$$

2.3.2 Eficiência da Combustão

Conforme Bazzo (1995), todo processo de combustão deve atender a princípios fundamentais que assegurem economia ou eficiência na queima do combustível. Mesmo em condições normais de operação, os processos de combustão não garantem aproveitamento total da energia disponível no combustível. Uma parcela significativa de energia é diretamente perdida para o meio ambiente, seja com os gases pela chaminé, com as cinzas, pelas paredes do equipamento ou mesmo pela combustão incompleta.

Se a composição elementar do combustível e a composição dos produtos da combustão podem ser medidos, é possível de se calcular a eficiência desta combustão. Conforme Lagemann (2016), pode-se controlar com máxima eficiência o processo de combustão com uma análise constante da qualidade de queima através de analisadores apropriados como por exemplo, o de oxigênio e de monóxido de carbono, dentre outros. A Figura 2.6 apresenta a zona de eficiência e os produtos da combustão.

Figura 2-6 - Zona de eficiência e produtos da combustão



Fonte: Lagemann (2016).

O excesso de ar, λ , varia em função das características do combustível. Se parte do combustível está escapando da região de combustão sem a completa oxidação pode ser observado pela presença de monóxido de carbono, CO, fuligem, combustível não queimado e hidrogênio, H, nos produtos de combustão.

Conforme Lagemann (2016), a eficiência da combustão pode ser definida pela “Eq. (2.32)”.

$$\eta = \left(\frac{Q_c}{m_c \cdot PCI} \right) 100 \quad (2.32)$$

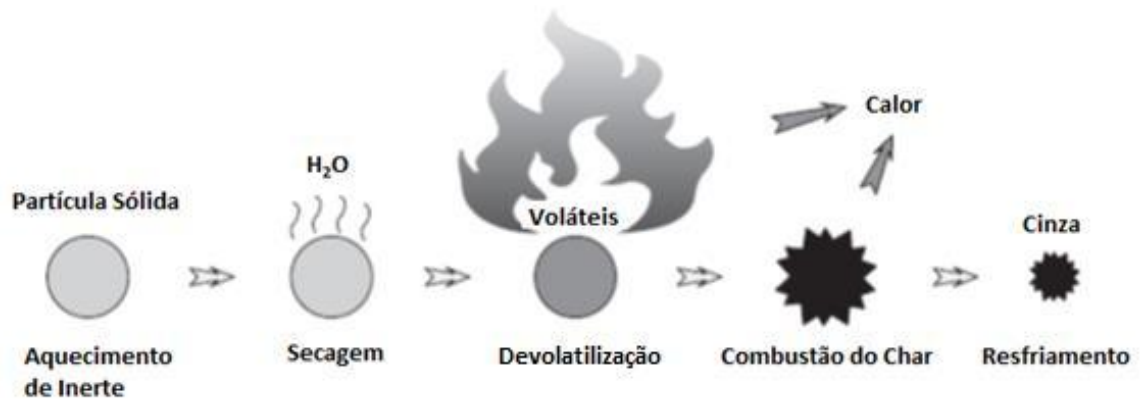
Onde Q_c é a taxa de calor liberada pela combustão, m_c a vazão mássica de combustível e PCI o poder calorífico inferior do combustível.

2.3.3 Combustão de Combustíveis Sólidos

A combustão de sólidos se diferencia da combustão de gases e de líquidos pela dependência de um número maior de parâmetros operacionais e dos combustíveis utilizados no processo. Parâmetros tais como umidade, teor de voláteis, geometria e porosidade de partícula e a velocidade gás-sólido devem ser considerados. Além disso, a maioria dos combustíveis sólidos contém matéria inorgânica que pode passar pelo sistema de combustão em grande parte não reagida, podendo oxidar e sofrer alterações de fase para formar matéria líquida tornando-se depósitos de escória ou incrustações.

O processo de combustão de sólidos, conforme mostrado na Figura 2.7, envolve algumas etapas que podem ser visualizadas em termos de reações em uma única partícula. O mecanismo geralmente aceito envolve, inicialmente, aquecimento e secagem das partículas. As partículas secas então pirolizam ou devolatilizam, produzindo uma variedade de espécies de char e voláteis. (MILLER e TILLMAN, 2008).

Figura 2-7 - Mecanismo de combustão de uma partícula sólida.



Fonte: Adaptado de Rosendahl (2013).

A combustão dos voláteis gasosos é rápida em comparação à combustão do char e uma alta proporção de voláteis diminui o tempo de permanência do combustível no leito. O char restante manterá predominantemente sua forma original e durante a queima, será reduzido a cinzas (ROSENDAHL, 2013).

2.3.3.1 Aquecimento e Secagem

Uma partícula, ao adentrar em uma região de combustão, inicialmente troca calor por convecção e radiação com os gases quentes ao seu redor e se aquece. Se estiver dentro de uma câmara de combustão ela também troca calor por radiação com as paredes da câmara. Quando a temperatura da superfície atingir a temperatura de saturação da água presente no sólido, inicia-se a etapa de secagem. Como a maioria das partículas de combustível sólido são porosas, como carvões de baixo rank e biomassa, elas contêm umidade na estrutura dos poros. Deste modo, o processo de secagem pode explodir uma única partícula de combustível em várias outras. Além disso, o processo de aquecimento e secagem mantém a temperatura das partículas até que a umidade se dissipe. (MILLER e TILLMAN, 2008).

2.3.3.2 Pirólise ou Devolatilização

Após a etapa de secagem inicia-se a pirólise que, de acordo com Van Loo e Koppejan (2008), pode ser definida como a degradação térmica na ausência de um agente oxidante fornecido externamente. Os produtos de pirólise são principalmente alcatrão, char e gases de baixo peso molecular. Além disso, o CO e o CO₂ podem ser formados em quantidades consideráveis, principalmente a partir de combustíveis ricos em oxigênio, como a biomassa.

Tipo de combustível, temperatura, pressão, taxa de aquecimento e tempo de reação são todas variáveis que afetam as quantidades e propriedades dos produtos formados. Os produtos de pirólise e de secagem, além de resfriarem a partícula, normalmente impedem a entrada de gases reagentes, como o oxigênio, no seu interior. Desta forma, a combustão do char (reação com oxigênio), resultante da pirólise da partícula, somente tem início após completada a etapa de secagem e pirólise.

2.3.3.3 Combustão do Char e dos Voláteis

No fim da etapa de pirólise, quando os fluxos de gases e vapores de dentro para fora da partícula se reduzem drasticamente, o oxigênio e outros gases reagentes presentes no lado externo, tais como o vapor d'água e o dióxido de carbono, podem penetrar no interior do resíduo carbonoso e reagir com os componentes sólidos. O mecanismo predominante, nesta etapa, diferentemente das etapas de aquecimento, secagem e pirólise, é o de difusão dos gases reagentes para dentro do resíduo carbonoso.

A reação do carbono com oxigênio, em condições normalmente encontradas em equipamentos de combustão, é muito rápida, ocorrendo praticamente na superfície da partícula de carvão. O oxigênio quase não penetra no seu interior, sendo totalmente consumido na superfície, levando a uma diminuição da espessura da camada de carvão ao longo da combustão.

2.3.4 Emissões Atmosféricas

Os poluentes possíveis de serem formados durante a queima de qualquer combustível orgânico são materiais particulados, óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3), monóxido e dióxido de carbono (CO e CO_2), e óxidos de nitrogênio (NO , N_2O e NO_2). As quantidades destes poluentes dependerão naturalmente dos combustíveis usados, dos modelos dos equipamentos de combustão, do seu estado de conservação e de operação (GARCIA, 2013).

Segundo Garcia (2013), material particulado é a denominação genérica que engloba fumaça, fuligem e cinzas. Fuligem, também chamada de “fumaça preta” são pequenas partículas de carbono e material carbonoso, parcialmente oxidado, isoladas ou impregnadas com as cinzas resultantes da combustão completa do restante do combustível. A fumaça propriamente dita, ou “fumaça branca” é constituída por gotículas de hidrocarbonetos ou outros produtos químicos voláteis não queimados. No caso da queima de madeira, a fumaça é extremamente complexa, sendo constituída por álcoois, cetonas, ácidos orgânicos e alcatrão

vegetal que não queimaram, resultantes da destilação seca da lignina. As cinzas são formadas pelos resíduos inorgânicos deixados na queima completa do combustível.

Conforme Carvalho e Lacava (2003), durante a combustão, praticamente todo o enxofre contido no combustível se oxida para SO_2 . A concentração resultante do gás nos produtos de combustão é uma função da porcentagem de enxofre contida no combustível e da razão ar/combustível. Entretanto, uma pequena parte do SO lançado para a atmosfera se oxida para SO_3 e este, pela reação com vapor d'água, é convertido em ácido sulfúrico, H_2SO_4 . A formação de SO_3 e H_2SO_4 pode ocorrer antes de os produtos de combustão deixarem a chaminé, se a temperatura for suficientemente baixa. O ácido é depositado no solo, nas águas e nas plantas com a chuva. Geralmente, essa chuva ácida também possui ácido nítrico formado a partir de óxidos de nitrogênio (NO_x). As quantidades de enxofre contidas nos combustíveis fósseis mais comuns são: carvão 0,1% a 6%, óleo residual 0,75% a 3%, gasolina cerca de 0,04% e diesel cerca de 0,22%. A biomassa contém baixos teores de enxofre, muitas vezes menores do que 1% o que pode viabilizar o seu uso em processos de co-combustão com carvão mineral em leito fluidizado, além disso, o enxofre contido no carvão pode reduzir o KCl, contido em algumas biomassas, a K_2SO_4 , evitando a formação de depósitos aderentes que favorecem a aglomeração. (KHAN, 2009).

NO_x é o termo geral que designa a soma de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2), os dois componentes de nitrogênio mais emitidos em processos de combustão. Normalmente, as quantidades de NO formadas são muito maiores que as de NO_2 . Contudo, uma vez lançado na atmosfera, o NO rapidamente se transforma em NO_2 e as taxas de emissão mássica de NO_x são sempre calculadas, considerando seus dois compostos, como exclusivamente NO. (CARVALHO e LACAVA, 2003). A alta temperatura de operação das câmaras de combustão, a utilização de combustíveis com elevados teores de nitrogênio e a disponibilidade de oxigênio, que é fornecido pelo sistema de combustão são fatores que contribuem para a formação de NO.

Conforme Garcia (2013), o monóxido de carbono (CO) é um gás inodoro e sem cor, formado na combustão incompleta de qualquer material carbonoso. É um gás altamente venenoso, pois reage com a hemoglobina das hemácias do sangue impossibilitando a troca gasosa entre oxigênio e gás carbônico nos pulmões. Naturalmente a concentração de CO nos gases de combustão vai depender muito da temperatura dos gases e do excesso de ar na combustão. Baixos excessos de ar levam a altos teores de CO a uma dada temperatura.

A oxidação completa do CO em CO_2 não soluciona totalmente o problema da emissão de poluentes em processos de combustão. A ausência do CO em áreas urbanas é sempre

desejável, por causa de sua alta toxicidade. No entanto, o CO₂ na atmosfera é um dos gases que absorvem a radiação infravermelha, contribuindo para o aquecimento global, ou seja, o chamado "efeito estufa" (CARVALHO e LACAVA, 2003).

Segundo Carvalho e Lacava (2003), os hidrocarbonetos não queimados, representados por C_xH_y, são a parte do combustível que não foi queimado e deixa a fornalha na forma de gotículas ou em fase gasosa, bem como produtos da degradação térmica do combustível primário em hidrocarbonetos de menor peso molecular. Está associado a capacidade de mistura entre os reagentes e o tempo de residência na câmara. O comportamento dos C_xH_y segue o mesmo padrão do CO em relação a eficiência de combustão bem como as medidas tomadas para minimizar CO são as mesmas para redução de C_xH_y.

2.3.4.1 Legislação Ambiental Para Emissões de Poluentes Atmosféricos

Em âmbito nacional, a resolução do CONAMA N°436/2011 estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007.

A conversão das concentrações medidas para o teor referencial de oxigênio deve ser calculada aplicando-se a “Eq. (2.33)”.

$$C_R = \frac{21-O_R}{21-O_M} C_M \quad (2.33)$$

Onde C_R é a concentração do poluente na condição de referência estabelecida pela resolução, O_R é o teor de oxigênio de referência para cada fonte estabelecido na resolução, O_M é o teor de oxigênio medido na amostragem e C_M é a concentração de poluente medida na amostragem.

De acordo com a resolução CONAMA N°436/2011, ficam estabelecidos limites de emissões provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de derivados da madeira, conforme Tabela 2.2.

Tabela 2-2 - Limites de emissões para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de derivados da madeira (Resolução N°436/2011 CONAMA).

Potência Térmica Nominal (MW)	MP ⁽¹⁾	NO _x ⁽¹⁾ (Como NO ₂)	CO ⁽¹⁾
-------------------------------	-------------------	--	-------------------

MW≤0,5	730	NA	7800
0,5<MW≤2	730	NA	3900
2<MW<10	730	NA	3250
10≤MW≤50	520	650	NA
MW>50	300	650	NA

⁽¹⁾ Os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca a 8% de oxigênio. NA – Não Aplicável. Fonte: Adaptado da Resolução N°436/2011 CONAMA.

Em âmbito regional, a FEPAM, por meio da Diretriz Técnica N°01/2018 estabelece os limites máximos de emissões a partir da combustão externa de carvão mineral e assemelhados, conforme a Tabela 2.3.

Tabela 2-3 - Limites de emissões a partir da combustão externa de carvão mineral e assemelhados (Diretriz Técnica N°01/2018 FEPAM).

Potência Térmica Nominal (MW)	MP ⁽¹⁾	NO _x ⁽¹⁾ (Como NO ₂)	SO _x (1)	CO ⁽¹⁾
MW≤10	300	1600	2700	500
10<MW≤70	200	800	2200	500
70<MW<500	80	750	1300	500
500<MW≤1000	65	600	950	250
MW>1000	50	400	400	250

⁽¹⁾ Os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca a 6% de oxigênio. Fonte: Adaptado da Diretriz Técnica N°01/2018 FEPAM.

2.4 Propriedades dos Combustíveis Sólidos

Os combustíveis sólidos são preparados (moídos ou pulverizados) antes de serem admitidos no sistema de combustão. No processo de queima liberam voláteis que reagem com o oxigênio do ar atmosférico liberando calor. No final do processo aparecem concentrações residuais de fuligem e elevados teores de cinza (LAGEMANN, 2016).

Para poder determinar a potencialidade de um combustível e, portanto, poder avaliar se este está sendo utilizado dentro de sua plena capacidade, deve-se primeiramente conhecer as suas características químicas e térmicas fundamentais, ou seja, sua composição química e seu potencial calórico. Essas características fundamentais são composição elementar, composição imediata e poder calorífico. (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008).

2.4.1 Composição Elementar

A composição elementar trata-se de uma das propriedades mais importantes pois dela serão realizados os cálculos exatos da combustão de um determinado combustível tais como as vazões mássicas de alimentação, o requisito teórico de ar, a quantidade e composição dos produtos da combustão. A análise elementar baseia-se na combustão do combustível sólido com oxigênio e a transformação do carbono, hidrogênio e nitrogênio, porventura presentes, em dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e nitrogênio (N_2).

2.4.2 Composição Imediata

Todo combustível sólido pode ser decomposto em quatro frações: umidade, matéria volátil, carbono fixo e cinzas que podem ser determinados através da análise imediata.

O teor de umidade do combustível indicará se é necessária a secagem do combustível antes de adentrar a zona de combustão. Teores elevados de umidade na combustão implicam em redução da temperatura máxima de combustão, necessitando de um maior tempo de residência do combustível no interior da fornalha ou a formação de emissões indesejáveis oriundas de uma combustão incompleta.

A matéria volátil é a porção expelida durante a decomposição térmica do combustível em forma de gás ou vapor d'água. Os principais constituintes da matéria volátil são H_2 , CO_2 , CO , CH_4 , H_2O entre outros hidrocarbonetos. De acordo com Basu (2006), a matéria volátil em base seca pode variar de 5% para carvão antracito até 75% para algumas biomassas. Combustíveis mais voláteis são mais reativos e, portanto, podem ser convertidos mais facilmente em gás, produzindo menos char.

Conforme Miller e Tillman (2008), o carbono fixo é o resíduo combustível depois de expulsar a matéria volátil. Representa a porção de carbono que deve ser queimada em estado sólido. Geralmente o carbono fixo é utilizado para determinar o *rank* do carvão.

Por definição, a cinza é o resíduo inorgânico remanescente após a ignição de substâncias combustíveis. A indicação do teor de cinzas presente no combustível trata-se de algo importante pois servirá para o dimensionamento dos equipamentos do sistema de exaustão de uma caldeira ou reator. De acordo com Modolo et al. (2014), durante a combustão de biomassa em um reator em leito fluidizado borbulhante são gerados dois tipos de cinzas: cinza de fundo e cinza leve. A cinza de fundo é composta basicamente por uma mistura de areia (principalmente quartzo) do leito original e por componentes inertes/inorgânicos (solos de floresta e pequenas pedras)

inclusos na biomassa. Adicionalmente alguns componentes orgânicos não queimados também podem estar presentes na cinza. A cinza leve possui característica similar, entretanto é composta pelas partículas finas que são aspiradas pelo sistema de exaustão do combustor.

2.4.3 Poder Calorífico

O poder calorífico pode ser definido como a quantidade de calor liberada, por unidade de massa ou de volume, do combustível, em um processo de combustão completa. Caso a água gerada na combustão esteja na fase líquida tem-se o poder calorífico superior e caso a água gerada na combustão esteja na fase gasosa tem-se o poder calorífico inferior. A diferença entre eles é, portanto, a entalpia de vaporização da água formada pela queima do hidrogênio contido no combustível e da água já contida no combustível como umidade. (GARCIA, 2013).

O poder calorífico inferior pode ser obtido através da “Eq. (2.34)”.

$$PCI = PCS - 2440 * (9H + W) \quad (2.34)$$

Onde PCS é o poder calorífico superior, H é o teor de hidrogênio do combustível e W o teor de umidade do combustível.

O PCS é geralmente obtido experimentalmente por meio de uma bomba calorimétrica. Sabendo-se o valor do PCS e dos teores de hidrogênio e de umidade do combustível pode-se obter o PCI por meio equação acima. Geralmente o PCI é mais utilizado, pois a combustão irá sempre ocorrer em uma temperatura onde a água liberada nos produtos da combustão encontra-se na fase gasosa.

De acordo com Khan et al. (2009), a biomassa geralmente possui valores de poder calorífico mais baixos que os do carvão devido a maior quantidade de oxigênio presente em sua composição. O teor de lignina das biomassas lignocelulósicas está fortemente correlacionado com o poder calorífico, sendo mais altos quando comparados aos teores de celulose e hemicelulose que possuem valores mais baixos devido ao seu maior grau de oxidação.

2.5 Co-Combustão

De acordo com Araújo (2008), a co-combustão encontra-se habitualmente associada à combustão de biomassa e carvão para a produção de energia. Comparativamente à combustão isolada de carvão mineral, a utilização de biomassas na co-combustão apresenta vantagens,

entre as quais se destacam a redução do total de emissões por unidade de energia produzida, diminuindo os níveis de emissão de poluentes associados à composição típica dos combustíveis fósseis como os óxidos de enxofre, os metais pesados ou as dioxinas e furanos. Além disso, a minimização de desperdícios e, dependendo da composição química da biomassa utilizada, a redução dos níveis de poluição do solo e água. Para que tais vantagens sejam aproveitadas no processo de co-combustão, é fundamental que as propriedades e características tanto da biomassa quanto do carvão mineral a serem utilizados sejam bem compreendidas.

2.6 Combustores em Leitos Fluidizado

Tempo, temperatura e turbulência são requisitos principais para um bom processo de combustão e esses três requisitos podem ser alcançados em um combustor em leito fluidizado. A excelente recirculação interna e externa de sólidos quentes à temperatura de combustão (entre 800 e 900 °C) fornece um longo tempo de permanência e temperatura adequada às partículas de combustível. O alto grau de mistura de gás sólido no leito fluidizado também fornece a turbulência necessária para uma boa combustão. (BASU, 2006).

2.6.1 Vantagens dos Combustores em Leito Fluidizado

São citadas por Basu (2006) algumas características que fazem com que os combustores em leito fluidizado se tornem mais atraentes em relação a outros tipos de caldeiras que utilizam combustíveis sólidos. Tais características são descritas a seguir:

- a) Flexibilidade de Combustível:
- b) Alta Eficiência de Combustão
- c) Remoção de Enxofre in loco
- d) Baixas Emissões de Óxidos de Nitrogênio

2.6.2 Co-Combustão em Leitos Fluidizados

Conforme Khan et al. (2009), dentre as tecnologias que podem ser usadas para a combustão de biomassa, leitos fluidizados têm se mostrado como sendo as melhores soluções devido a sua flexibilidade em relação ao tipo de combustível e elevada eficiência, embora ainda alguns problemas de aglomeração ocasionados por certas biomassas têm sido relatados.

Zeyu et al. (2020) avaliaram as emissões de gases em um processo de co-combustão de carvão mineral e palha de trigo em um combustor em leito fluidizado borbulhante em escala laboratorial. Os resultados indicaram redução nos teores de CO, NO_x e SO₂ nos gases de exaustão bem como a redução do teor de carbono nas cinzas volantes quando comparados a combustão singular do carvão mineral. A liberação de metais pesados nos gases de exaustão, tais como Zn, Cd e Pb também foram reduzidos utilizando a co-combustão.

Hoffmann et al. (2012) avaliaram os limites técnicos e econômicos da adição de biomassa a uma caldeira em leito fluidizado utilizando carvão mineral sul-brasileiro. Os resultados indicaram que o principal limite técnico para aplicação de co-combustão ocorreu devido ao aumento do volume dos gases de exaustão, entretanto a adição da biomassa se mostrou favorável até um limite máximo de 30% da capacidade da planta para uma usina de 600 MW.

Unchaisri et al. (2017) investigaram a eficiência de combustão, emissões de gases (CO, NO_x e SO₂) e fenômeno de aglomeração no processo de co-combustão de pellets de palha de arroz com carvão mineral em um reator em leito fluidizado circulante. Resultados mostram que a elevação do excesso de ar reduziu as emissões de CO até um certo valor, a partir deste as emissões novamente se elevaram devido a um menor tempo de residência impossibilitando a combustão completa. Teores de NO_x e SO₂ foram reduzidos com o acréscimo de biomassa devido ao baixo teor de N e S contidos nos pellets. Não houve aglomeração do leito com adição de biomassa em frações de até 50%.

Tarelho et al. (2011) realizaram a combustão de resíduos florestais de biomassa em um combustor piloto em leito fluidizado borbulhante com o propósito de avaliar a eficiência de combustão através da emissão de CO₂. Resultados mostraram que entre 97,2 a 99,3% do carbono contido na biomassa foi convertido em CO₂, indicando uma alta eficiência de combustão. Além disso, as emissões de outros gases resultantes do processo, como o CO, NO e compostos orgânicos voláteis em condições ideais de operação do reator ficaram abaixo dos limites estipulados pela legislação ambiental.

Ninduagdee e Kuprianov (2018) investigaram os efeitos nos gases de exaustão a partir da co-combustão de pellets de casca de arroz e casca de arroz úmida em um combustor em leito fluidizado borbulhante. Os resultados mostraram que sob condições operacionais ideais, o combustor apresentou uma elevada eficiência de combustão (~99%) e baixas emissões de NO. Entretanto, observou-se um aumento nas emissões de CO e hidrocarbonetos utilizando a técnica proposta.

Guo e Zhong (2018) estudaram a co-combustão de carvão antracito e pellets de madeira em um combustor em leito fluidizado borbulhante. Resultados de co-combustão mostraram redução nas emissões de gases poluentes como SO_2 e NO assim como alguns metais traços como Cr, Ni e V. A formação de *slagging* nas cinzas também foi reduzida quando comparada a combustão singular do pellet. A adição de pellets em grande quantidade impactou no comportamento fluidodinâmico do leito causando uma combustão ineficiente.

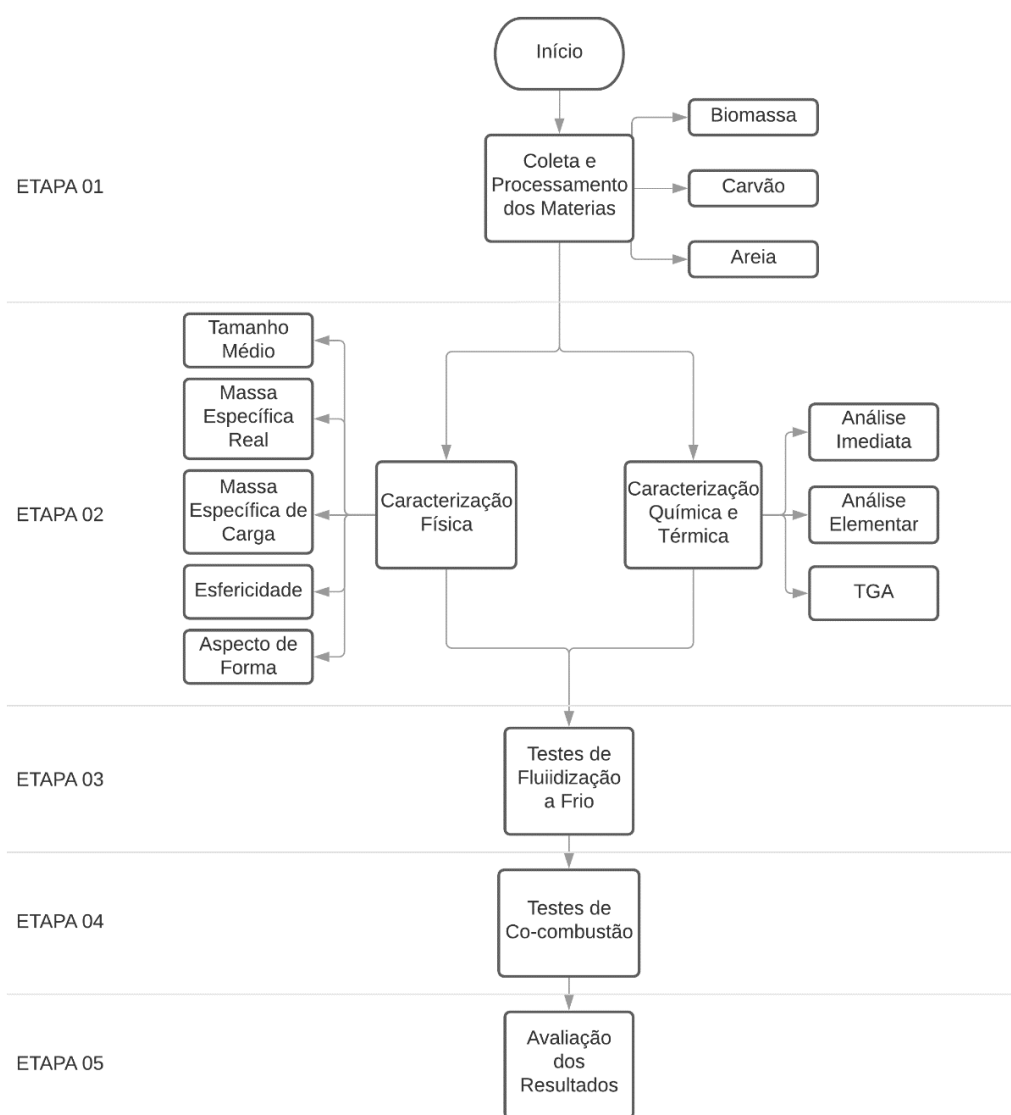
Linhares (2016) avaliou a co-combustão de diferentes proporções de resíduos de casca de acácia negra (RCAN) com carvão mineral. Resultados evidenciaram que a adição da biomassa RCAN afetou fortemente a fluidodinâmica do leito elevando as velocidades características de fluidização proporcionalmente ao seu acréscimo. A co-combustão favoreceu a diminuição das concentrações de SO_2 nos gases gerados, mantendo-as em níveis ambientalmente aceitáveis.

Além da conversão energética em processos de co-combustão, os leitos fluidizados também são utilizados para outras aplicações como no processamento petroquímico, (craqueamento catalítico, reações de síntese), processamento mineral (calcinação de alumina, fabricação de cimento), indústria química e farmacêutica, secagem, revestimento de partículas, tratamento térmico, entre outros (BASU,2006).

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo são descritos os equipamentos utilizados e a metodologia empregada para caracterização dos materiais, testes de fluidização a frio e de co-combustão no reator. A metodologia está dividida em cinco etapas. Na primeira etapa foi feita a coleta e o processamento do material do leito e do combustível (areia, carvão mineral e biomassa de eucalipto). Na etapa seguinte foram realizadas a caracterização física, química e térmica dos materiais. Na etapa 3, foram realizados os testes de fluidização a frio. Na etapa 4 foram realizados os testes de co-combustão no reator e, por fim, na última etapa, os resultados obtidos bem como suas análises. A Figura 3.1 ilustra um fluxograma com as etapas da metodologia.

Figura 3-1 - Etapas da metodologia.

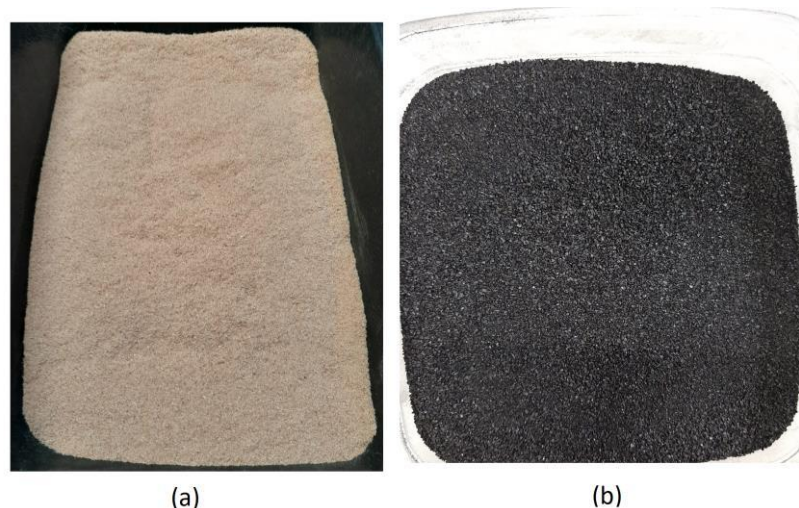


Fonte: O autor.

3.1 Materiais

A biomassa utilizada é a serragem de *Eucalyptus grandis*, coletada diretamente da serra e utilizada pela empresa Zomer Móveis para fabricação de móveis e utensílios domésticos. A madeira é oriunda do Horto Florestal São Martinho, localizado no município de Arroio dos Ratos, no estado do Rio Grande do Sul e serrada de árvores a partir de 18 anos de idade. O carvão mineral é originário de uma jazida na Colômbia, utilizado para geração termelétrica na usina de Pecém e foi fornecido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A areia empregada é uma areia comercial do tipo médio e foi adquirida em loja de material de construção. O aspecto final da biomassa de eucalipto e do carvão mineral, após a caracterização física, podem ser visualizados na Figura 3.2.

Figura 3-2 - Amostras da serragem de eucalipto (a) e do carvão mineral (b) utilizados na pesquisa.



Fonte: O autor.

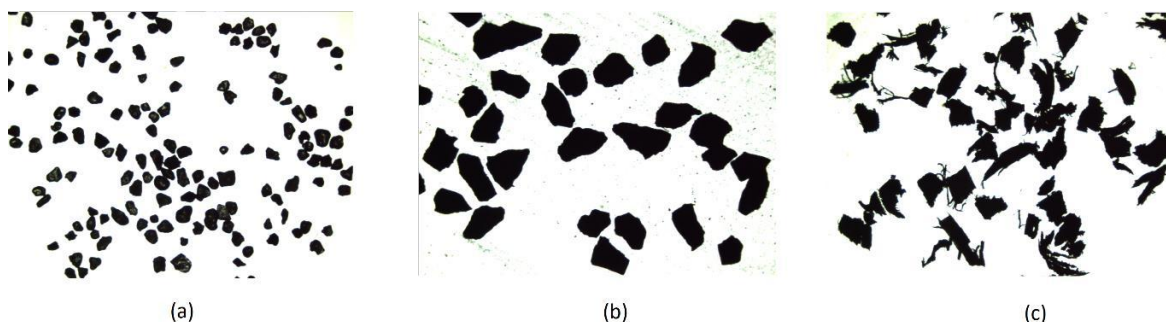
3.1.1 Caracterização Física dos Materiais

Para caracterização física dos materiais foram utilizadas as técnicas para determinação do tamanho médio de partícula, massa específica real, massa específica de carga, esfericidade e razão de aspecto.

O diâmetro médio das partículas de areia, assim como a esfericidade e razão de aspecto das partículas de areia e carvão mineral foram obtidos através de análise microscópica de imagem. Foi utilizado um equipamento de medição de imagens tridimensional da marca Starrett, modelo Galileo AV 300+ automático com aumento de 62x. As imagens retiradas do

equipamento foram tratadas, posteriormente, pelo software Image J, empregando a metodologia proposta por Silva (2019). A característica física de cada material pode ser visualizada na Figura 3.3.

Figura 3-3 - Característica física dos materiais do leito: (a) areia, (b) carvão mineral, (c) biomassa.



Fonte: O autor.

O tamanho médio de partícula da biomassa e do carvão foram obtidos por peneiramento, utilizando peneiras com aberturas conforme a norma NBR NM-ISO 3310-1 e calculado por média aritmética.

As massas específicas reais foram determinadas por picnometria utilizando um picnômetro a gás hélio da marca Micrometics, modelo AccuPycII 1340, localizado no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMAT) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). O equipamento possui precisão de 0,02% e exatidão de 0,03% na leitura e atende as normas ASTM C604-2012 e ASTM D6761-2012. Para obtenção das massas específicas de carga foi utilizada uma balança digital com resolução de 0,001 g e uma proveta de vidro com volume total de 25 ml.

3.1.2 Caracterização Química e Térmica dos Combustíveis

Para a caracterização química e térmica dos combustíveis foram empregadas a análise elementar, análise imediata, poder calorífico e análise termogravimétrica.

A análise elementar do carvão mineral foi fornecida pela UFRGS, sendo determinada conforme a norma NBR 8631. A análise elementar da biomassa de eucalipto foi a mesma utilizada por Ocanha et al. (2020), sendo estabelecida utilizando-se o método de Pregl-Dumas. A tabela 3.1 apresenta os resultados de análise elementar dos combustíveis utilizados.

Tabela 3-1 - Análise elementar da biomassa de eucalipto e do carvão mineral.

Análise Elementar		
Combustível Elemento	Eucalipto	Carvão
C (p.% b.s.)	53,8	78,6
H (p.% b.s.)	5,7	4,8
O (p.% b.s.)	40,5	7,2
N (p.% b.s.)	0	1,4
S (p.% b.s.)	0	0,6

Fonte: O autor.

As análises de poder calorífico foram realizadas no LCVMAT da UNISINOS, utilizando-se um calorímetro da marca IKA, modelo C200, conforme norma ISO 1928:2009. O instrumento utilizado tem resolução de 1 kJ e erro máximo de 0,1% do valor medido.

As análises imediata e termogravimétrica foram realizadas no Laboratório de Siderurgia (LASID) da UFRGS. A determinação da umidade foi realizada de acordo com a norma NBR 8293. O teor de cinzas nas amostras foi obtido segundo a norma NBR 8289. O conteúdo volátil foi determinado conforme a norma NBR 8290 e o teor de carbono fixo foi determinado pela diferença entre os percentuais de umidade, cinza e matéria volátil e o total da amostra.

Os ensaios de termogravimetria dos combustíveis foram realizados em uma termobalança da marca NETZSCH STA modelo 409PC/PG, conforme ilustra a Figura 3.4. Utilizou-se um fluxo de ar de 20 ml/min e taxa de aquecimento de 20 °C/min.

Figura 3-4 - Termobalança de precisão NETZSCH STA 409PC/PG.

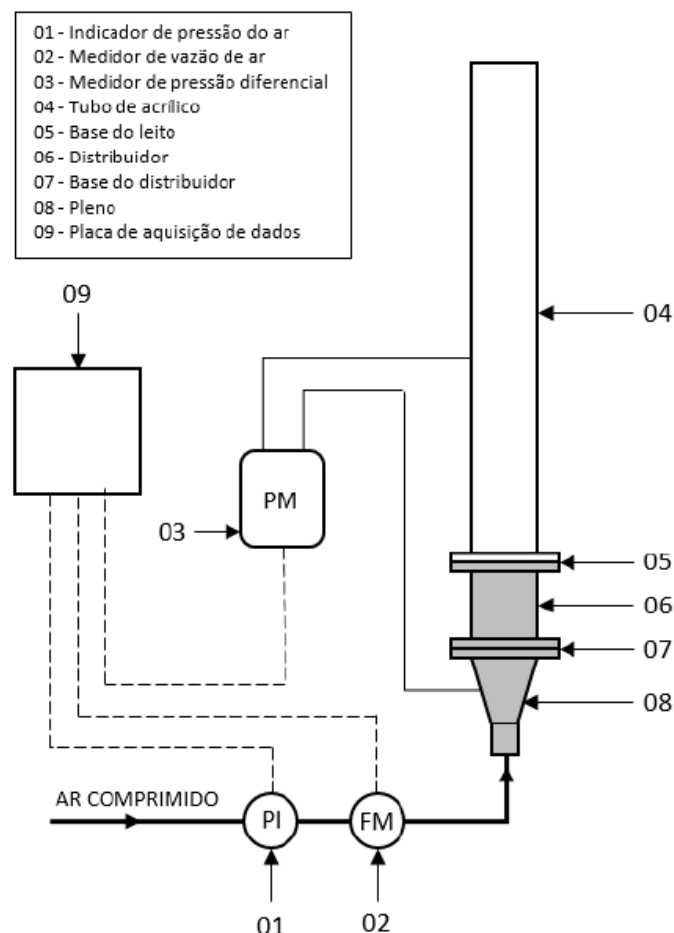


Fonte: O autor.

3.2 Bancada de Fluidização

Conforme descrito por Genehr et al. (2020), o sistema de bancada de fluidização, mostrado na Figura 3.5, é composto por um indicador de pressão de ar da rede (1), um medidor de vazão de ar da rede (2) e um medidor de pressão diferencial (3). Para determinar a queda de pressão ao longo do leito, o sistema de coluna do leito (4) é constituído por um tubo de acrílico de 94 mm de diâmetro e 3 mm de espessura de parede conectado à base por meio de flanges, uma base para o leito (5), um distribuidor de ar (6) constituído por tela de metal com abertura de 0,15 mm de diâmetro que tem por função distribuir uniformemente o ar insuflado além de dar sustentação ao material do leito, uma base para o distribuidor (7) e o pleno (8) (região abaixo do distribuidor por onde entra o ar insuflado). Em seu interior foram inseridas esferas de vidro de 9 mm, distribuídas aleatoriamente com a função de homogeneizar o fluxo de ar, placa de aquisição de dados (9) constituída por um módulo de leitura e registro da marca NOVUS, modelo Fieldlogger.

Figura 3-5 - Bancada de fluidização.



Fonte: Genehr et al. (2020).

3.3 Testes de Fluidização a Frio

Inicialmente, foram realizados testes de misturas binárias de biomassa e inerte, e carvão mineral e inerte em proporções de 5, 10 e 20% em massa em relação à massa total do leito. Em seguida, foram utilizadas misturas de carvão mineral e biomassa nas proporções em massa de C75B25, C50B50 e C25B75, conforme pode ser visualizado na Tabela 3.2. Estas misturas foram adicionadas ao inerte nas proporções de 5, 10 e 20% em massa em relação à massa total do leito. Linhares et al. (2016) avaliaram a fluidização de misturas ternárias de biomassa, carvão e areia em proporções em massa de 3, 5 e 10%. Ocanha et al. (2020) utilizaram frações de biomassa de 20, 40, 60 e 80% do volume total da mistura.

Tabela 3-2 - Percentual em volume e em massa das misturas em relação ao total do leito.

Material	Mistura	%Volume	%Massa
COB100-inerte	1	33%	5,0%
	2	51%	10,0%
	3	70%	20,0%
C100B0-inerte	4	12%	5,0%
	5	22%	10,0%
	6	38%	20,0%
C75B25-inerte	7	14%	5,0%
	8	25%	10,0%
	9	43%	20,0%
C50B50-inerte	10	17%	5,0%
	11	30%	10,0%
	12	50%	20,0%
C25B75-inerte	13	22%	5,0%
	14	38%	10,0%
	15	58%	20,0%

Fonte: O autor.

Para todos os testes, a altura do leito contendo as misturas foi mantida na proporção de altura e diâmetro do leito de $H/D=1$, conforme empregado por Ocanha et al. (2020) e Genehr et al. (2020), tendo por objetivo evitar a formação de *clusters*.

3.3.1 Obtenção das Curvas de Fluidização e Defluidização

Primeiramente, foram inseridas no interior do leito as misturas previamente separadas. Para que houvesse uma mistura homogênea das partículas, foi aberta a válvula de admissão até a completa fluidização, aguardando-se por 10 segundos. Logo após, a válvula de admissão foi fechada, instantaneamente, até a defluidização completa do leito. Após observação visual sobre a qualidade de mistura das partículas, foi iniciado o processo de fluidização.

Os testes seguiram a metodologia empregada por Silva (2019). A abertura da válvula de admissão foi efetuada manualmente, de forma constante, aguardando-se 10 segundos a cada incremento da vazão. A aquisição dos dados de queda de pressão e vazão de ar foi realizada a cada segundo e o tempo total de abertura da válvula de admissão foi em torno de 3 minutos, para uma vazão máxima de ar de até 50 Nm³/h. Após a fluidização completa, iniciou-se a defluidização, fechando-se gradualmente a válvula de admissão, no mesmo intervalo de tempo do procedimento anterior. Conforme descrito no capítulo 2, foram utilizadas para comparação do estudo, as curvas de defluidização por estarem menos suscetíveis ao arranjo inicial do leito.

3.4 Combustor em Leito Fluidizado Borbulhante

O combustor em leito fluidizado borbulhante que se encontra nas dependências do Laboratório de Combustão (LC) da UFRGS, conforme descrito por Bianchi (2018), é composto por uma câmara de combustão cilíndrica de 120 mm de diâmetro interno e altura livre de 1620 mm confeccionado em chapa de 4 mm de aço inoxidável austenítico AISI 310.

O combustor possui em sua base um compartimento denominado de câmara plena, responsável por estabilizar o escoamento e absorver flutuações de pressão do gás de entrada antes da placa perfurada distribuidora de ar na base inferior da câmara de combustão. A geometria da câmara plena tem diâmetro e altura útil de 385 mm.

Para evitar a formação de um gradiente de temperatura significativo na parede do combustor e garantir a temperatura de estabilização do sistema, um forno elétrico, dividido em 3 zonas de aquecimento, com 3800 W cada, foi construído de forma a circundar o corpo cilíndrico do equipamento. A potência de projeto permite o aquecimento do forno a temperaturas próximas de 1000 °C, possibilitando também, auxiliar no aquecimento inicial do sistema, no processo de partida.

A saída superior da câmara de combustão está ligada a um ciclone de separação sólido-gás do tipo Stairmand com diâmetro de referência do corpo cilíndrico de 80 mm interno, que é

responsável por separar as partículas elutriadas da câmara de combustão dos gases de exaustão. A base inferior do ciclone possui um silo que acumula o material particulado capturado e pela saída superior o gás purificado é expelido para a atmosfera.

O ar injetado na base do combustor em leito fluidizado é medido por um dispositivo de medição de vazão do tipo rotâmetro com escala de 0-400 L/min a temperatura e pressão ambiente (21 °C e 101,3 kPa) controlado por uma válvula de agulha. Após medição e controle de vazão, o ar é aquecido por um pré-aquecedor elétrico com potência de projeto de 3000 W antes de ser inserido na câmara plena. O pré aquecedor permite o aquecimento do ar propiciando temperatura ajustável a partir da condição ambiente até temperaturas próximas a 500 °C e vazões nominais a montante do pré-aquecedor de até 370 L/min.

O sistema de alimentação do combustível é composto por uma válvula do tipo alimentador helicoidal com corpo metálico montado em aço carbono e helicóide em poliamida de nome comercial *Technyl* adaptada para baixa vazão e com razoável precisão de ajuste e controle. O acionamento do alimentador é feito por um motor de corrente contínua com alimentação variável de 0-24 V, podendo ser ajustado com ajuda de um regulador de tensão variável analógico. Foi confeccionada uma nova rosca helicóide com um passo menor do que a utilizada por Bianchi (2018). Assim, foi possível a utilização de apenas um redutor para se trabalhar com maiores velocidades de alimentação a fim de se reduzir a intermitência na alimentação.

A alimentação de combustível ao reator se dá a uma altura de 400 mm a partir da placa distribuidora. Para evitar o aquecimento precoce e a possível volatilização das frações mais leves, este tubo inclinado é provido de camisa d'água, mantendo assim a temperatura adequada ao melhor desempenho do equipamento.

O distribuidor de ar é do tipo placa perfurada e foi construído conforme metodologia proposta por Basu (2006). Essa placa é composta por 384 furos de 1 mm de diâmetro cada, com espaçamento entre furos de 5,5 mm e arranjo triangular. Para evitar a descida da areia pelos furos do distribuidor até a câmara plena, uma tela de aço inox com abertura de 200 µm foi colocada na parte superior do distribuidor.

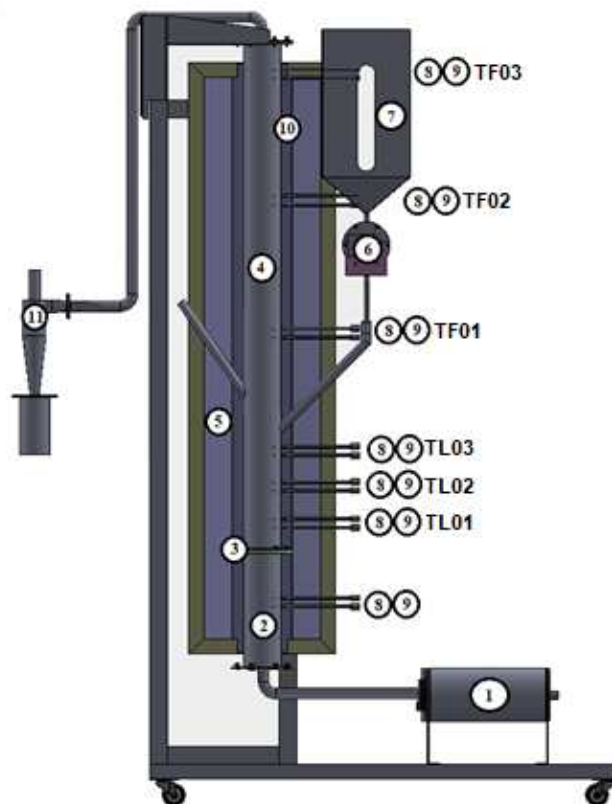
Devido às dificuldades impostas pela manufatura dos furos da placa e a possibilidade de aços sofrerem o fenômeno de flambagem devido à variação de temperatura, optou-se pelo emprego da fibra cerâmica de sílica e alumina de nome comercial Silplate 1108 do fabricante Unifrax (Unifrax I LLC, 2015). Por fim, para o sistema de retirada de cinzas e manutenção do nível do leito, a placa foi modificada de maneira a ter um furo central por onde um dreno de

diâmetro externo de 34 mm é posicionado possibilitando a variação da altura do leito e eliminação das partículas do reator ao fim do experimento.

O equipamento conta ainda com 11 termopares tipo K posicionados próximos à parede do combustor, sendo 1 na câmara plena, o qual é responsável pelo monitoramento da temperatura de aquecimento do ar primário, 6 termopares distribuídos na câmara de combustão, sendo 3 deles na região de leito fixo e expandido (TL01, TL02 e TL03) e 3 na região do *freeboard* (TF01, TF02 e TF03), 1 termopar na saída do pré-aquecedor para o controle da temperatura de aquecimento do mesmo e 3 termopares para medição e posterior controle das zonas de aquecimento do forno. Posteriormente, foi adicionado um termopar na descida do duto de alimentação para monitoramento de temperatura nesta região.

Pontos de tomada de pressão também estão distribuídos pela estrutura do equipamento de modo a monitorar as perdas de carga, bem como verificar a altura do leito a partir da perda de carga. A Figura 3.6 exibe o esquemático do combustor em leito fluidizado.

Figura 3-6 - Combustor em leito fluidizado borbulhante. 1- pré-aquecedor de ar, 2- câmara plena, 3- placa distribuidora, 4- câmara de combustão, 5- isolamento, 6 – alimentador, 7 – silo, 8 – termopares, 9 – tomada de pressão, 10 – forno elétrico, 11 – ciclone.



Fonte: Wander et al. (2020).

A fim de evitar vazamentos de gases pelo tubo de alimentação, o que poderia ocasionar a devolatilização da biomassa e do carvão no próprio tubo, optou-se pela utilização de tiragem mista de modo que o reator operasse em condições de leve pressão negativa. Para tanto, utilizou-se um exaustor centrífugo marca Artek modelo EAC ½ MAR controlado por um inversor de frequência da marca WEG modelo CFW 100.

Para controle da pressão interna do reator foi utilizado um manômetro de coluna d'água ligado a uma das tomadas de pressão do *freeboard* (zona menos densa dentro do reator) onde foram utilizadas pressões negativas na faixa de 50 a 200 Pa para esta operação, de acordo com cada um dos regimes de fluidização trabalhados e suas oscilações de pressão devido a turbulências.

3.5 Sistema de Análise dos Gases de Combustão

Os gases O₂, CO₂, SO₂ e NO, oriundos da combustão, foram medidos por um analisador de gases contínuo da marca SIEMENS modelo Ultramat 23, conforme mostrado na Figura 3.7.

Figura 3-7 - Analisador de gases contínuo SIEMENS Ultramat 23.



Fonte: O autor.

O composto CO foi medido por um analisador portátil da marca ECIL modelo Chemist 500, conforme Figura 3.8. De maneira a se preservar a vida útil dos analisadores, a tomada para captação dos gases foi instalada após o ciclone, região de menor concentração de particulados.

Figura 3-8 - Analisador de gases portátil ECIL Chemist 500.



Fonte: O autor.

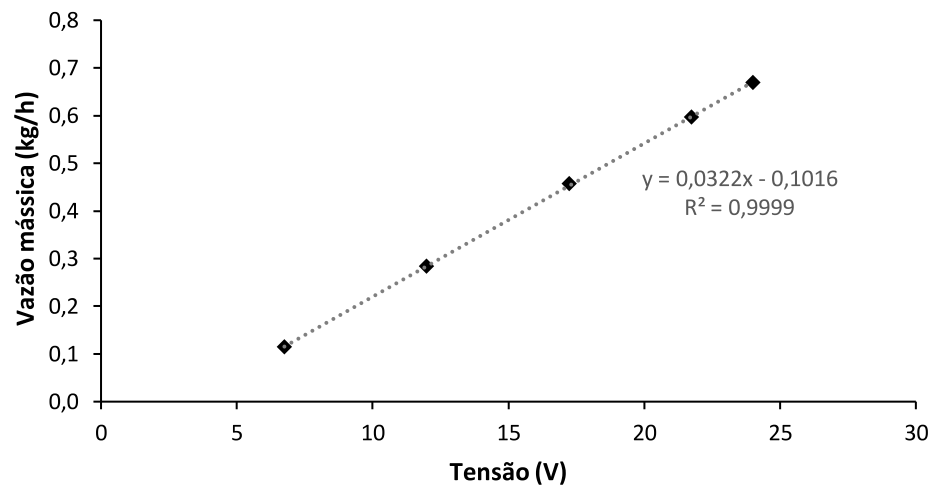
3.5 Testes de Co-combustão

Para os testes de co-combustão, devido à necessidade de maior quantidade de material a se utilizar bem como a disponibilidade das peneiras, foram utilizadas partículas de carvão mineral e de biomassa com uma maior distribuição granulométrica quando comparada aos testes de fluidização a frio. Os testes de co-combustão foram realizados variando-se a razão de carvão e biomassa na mistura combustível. Primeiramente, foi inserido o material inerte no interior do reator através do tubo de alimentação de combustível a uma altura de, aproximadamente, 400 mm acima do distribuidor. A altura estática do leito foi mantida em 240 mm, ou seja, na proporção de altura e diâmetro do leito de $H/D=2$. Optou-se por esta proporção a fim de se obter um melhor monitoramento da temperatura ao longo do leito. Logo após, deu-se início ao processo de aquecimento por meio do acionamento das resistências elétricas do forno e inserção do ar aquecido na base do leito. A relação velocidade superficial do gás por velocidade mínima de fluidização foi mantida em 3 vezes considerando a velocidade mínima

de fluidização da areia que, conforme Basu (2006), representa mais de 95% do total da massa de sólidos no leito. Com a pressão do leito estável e a temperatura acima da temperatura de ignição do carvão mineral, em torno de 500 °C, deu-se início a inserção do combustível no leito.

O cálculo da vazão mássica de combustível foi realizado pela medição da quantidade de massa de combustível que passou pela helicoide em um determinado intervalo de tempo. Com as vazões mássicas obtidas, para cada valor de tensão aplicada no alimentador, foi possível determinar a curva de calibração do alimentador. A Figura 3.9 mostra a curva de calibração para a mistura C90B10.

Figura 3-9 - Curva de calibração do alimentador para a mistura C90B10.



Fonte: O autor.

A massa de ar estequiométrica, necessária para a combustão completa do combustível no interior do reator, foi calculada pela equação 2.29, considerando os teores dos principais elementos presentes nas misturas entre o combustível e o ar, tais como O, N, C, H e S. O excesso de ar foi estabelecido em 50, 80 e 100 % para todas as misturas efetuadas, assim, a vazão mássica de combustível e de ar foram ajustadas para que a relação velocidade superficial do gás pela velocidade mínima de fluidização das partículas se mantivesse sempre em 3.

Na primeira operação foi realizada a combustão singular do carvão mineral e coletada as amostras dos gases de exaustão. Nas operações seguintes, foram inseridos percentuais de biomassa em proporções de massa em 10 e 25 % em relação ao carvão.

Os materiais combustíveis foram misturados manualmente antes de serem acondicionados no silo de alimentação. A Tabela 3.3 apresenta a matriz de testes realizados no

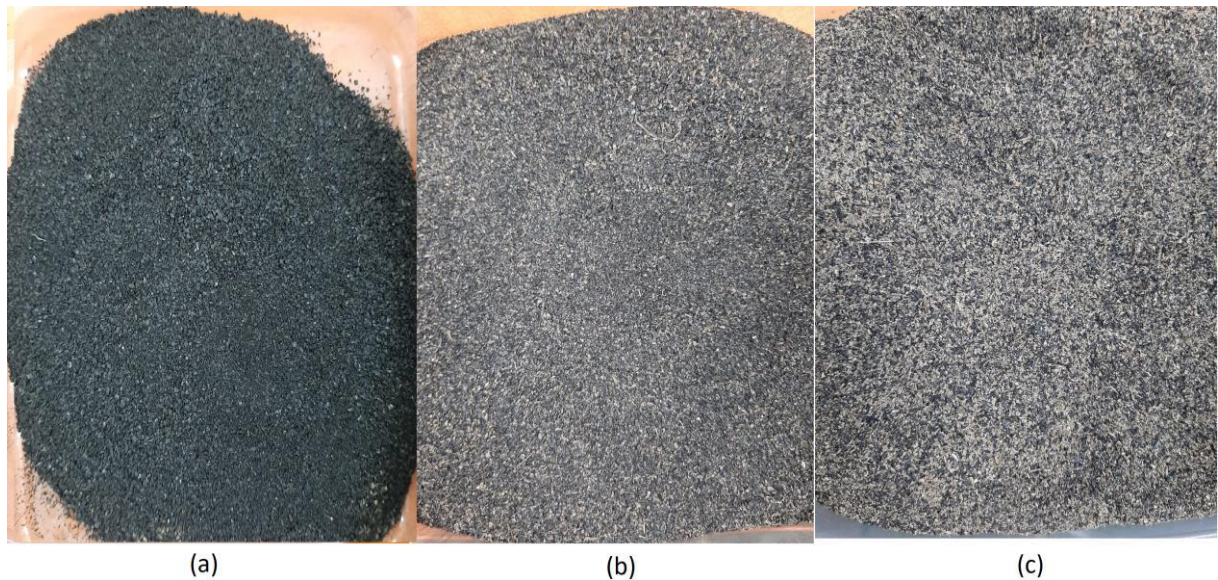
combustor. A Figura 3.10 mostra as misturas C100B0, C90B10 e C75B25 antes de serem inseridas no silo.

Tabela 3-3 - Matriz de testes do combustor.

Teste	Biomassa (% em massa)	Excesso de Ar
1	0	1,5
2	0	1,8
3	0	2
4	10	1,5
5	10	1,8
6	10	2
7	25	1,5
8	25	1,8
9	25	2

Fonte: O autor.

Figura 3-10 - Misturas utilizadas nos testes de co-combustão: (a) C100B0 (b) C90B10 (c) C75B25.



Fonte: O autor.

As condições de cada operação bem como as amostragens dos gases de exaustão foram realizadas após o leito atingir o regime estacionário de operação, em que as vazões mássicas de

combustível foram constantes e a temperatura de operação uniforme (800 a 900 °C). Para o analisador Siemens, as amostras dos gases SO₂, NO, O₂ e CO₂ foram coletadas durante um período de 20 min de medição contínua. Para o analisador Chemist, as amostras de CO foram coletadas em triplicata e foi considerada a média das medições durante um intervalo de 1 min para cada medição.

Após a medição dos gases, verificação da temperatura de operação e coleta da cinza após o ciclone, outro teste foi realizado, alterando-se os parâmetros de acordo com a composição elementar da nova mistura e aguardando o novo regime estacionário para esta configuração.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados de caracterização física, química e térmica dos materiais bem como os testes de fluidização a frio, operação do combustor, testes de co-combustão, análise de emissões e das cinzas geradas.

4.1 Caracterização Física dos Materiais

Os resultados da caracterização física dos materiais podem ser verificados na Tabela 4.1.

Tabela 4-1 - Propriedades físicas dos materiais.

Material Propriedade	Areia	Carvão	Eucalipto
Granulometria testes a frio (μm)	300-425	600-850	600-850
Granulometria co-combustão (μm)	300-425	250-1000	250-1000
Diâmetro médio da partícula, d_p (μm)	378	-	-
Massa específica real, ρ_p (g/cm^3)	2,61	1,35	1,39
Massa específica de carga, ρ_b (g/cm^3)	1,53	0,62	0,17
Esfericidade, ϕ_s [-]	0,72	0,66	-
Razão de aspecto, R_A [-]	0,71	0,65	-

Fonte: O autor.

A Tabela 4.1 apresenta as diferenças entre as massas específicas de carga encontradas para cada material sendo a massa específica de carga da biomassa em torno de 9 vezes menor que a da areia e 3,5 vezes inferior à do carvão. Já a massa específica real encontrada para a biomassa é semelhante à do carvão sendo ambas aproximadamente duas vezes menor que a da areia. O tamanho médio de partícula, utilizado no teste de fluidização, para o carvão e para a biomassa foi de, aproximadamente, duas vezes o tamanho utilizado para a areia. Optou-se por utilizar este tamanho de partícula devido a maior disponibilidade dos materiais nestas faixas granulométricas e para melhor homogeneidade das misturas. O aumento da relação entre tamanhos de partículas que compõe o leito aumenta também a zona de segregação, distanciando as velocidades inicial e completa de fluidização, conforme indicam os trabalhos de Fotovat et

al. (2013); Ataíde et al. (2013); Lourenço e Tannous, (2015). A esfericidade encontrada para as partículas de areia foi próxima da esfericidade encontrada por Ocanha et al. (2020) e Genehr (2015). Para as partículas de carvão, a esfericidade encontrada mais próxima de 1, sugere tratar-se de uma partícula com uma boa homogeneidade o que é positivo em sistemas de alimentação com tubos inclinados, o qual foi utilizado no reator. Já para a biomassa, devido à baixa homogeneidade entre as partículas, não foi possível obter um valor para a esfericidade pelo método empregado, entretanto, o seu perfil mais alongado, pode acabar dificultando o sistema de alimentação. Ocanha et al. (2020) encontraram valores para a massa específica real da areia de $2,59 \text{ g/cm}^3$ e de $0,25 \text{ g/cm}^3$ para a massa específica de carga da biomassa de eucalipto. Linhares et al. (2016) encontraram valores para a massa específica real do carvão mineral de $1,66 \text{ g/cm}^3$. Genehr et al. (2020) encontraram valores de massa específica real de $1,39 \text{ g/cm}^3$ para a biomassa de eucalipto. Bianchi (2018) utilizou uma granulometria da areia entre 250 e 350 μm . De acordo com Linhares (2016), uma maior heterogeneidade entre as partículas de combustível pode ocasionar segregação do leito e uma possível diferença de temperatura no interior do reator.

4.2 Análise Imediata, Análise Elementar e Poder Calorífico

A Tabela 4.2 apresenta os resultados de análise imediata, análise elementar e poder calorífico da biomassa de eucalipto e do carvão mineral de Pecém. Tais resultados foram utilizados para cálculo das vazões mássicas de combustível inseridos no reator.

Tabela 4-2 - Resultados de análise imediata, análise elementar e poder calorífico dos combustíveis.

Análise Imediata		
Combustível	Eucalipto	Carvão
Propriedade		
Umidade (p.% b.u.)	10,7	12,6
Cinzas (p.% b.s.)	0,06	7,9
Matéria Volátil (p.% b.s.)	87,1	39,1
Carbono Fixo (p.% b.s.)	12,8	52,9
Análise elementar		
C (p.% b.s.)	53,8	78,6

H (p.% b.s.)	5,7	4,8
O (p.% b.s.)	40,5	7,2
N (p.% b.s.)	0	1,4
S (p.% b.s.)	0	0,6
Poder Calorífico (MJ/kg)		
PCS	18,891	28,074

Fonte: O autor.

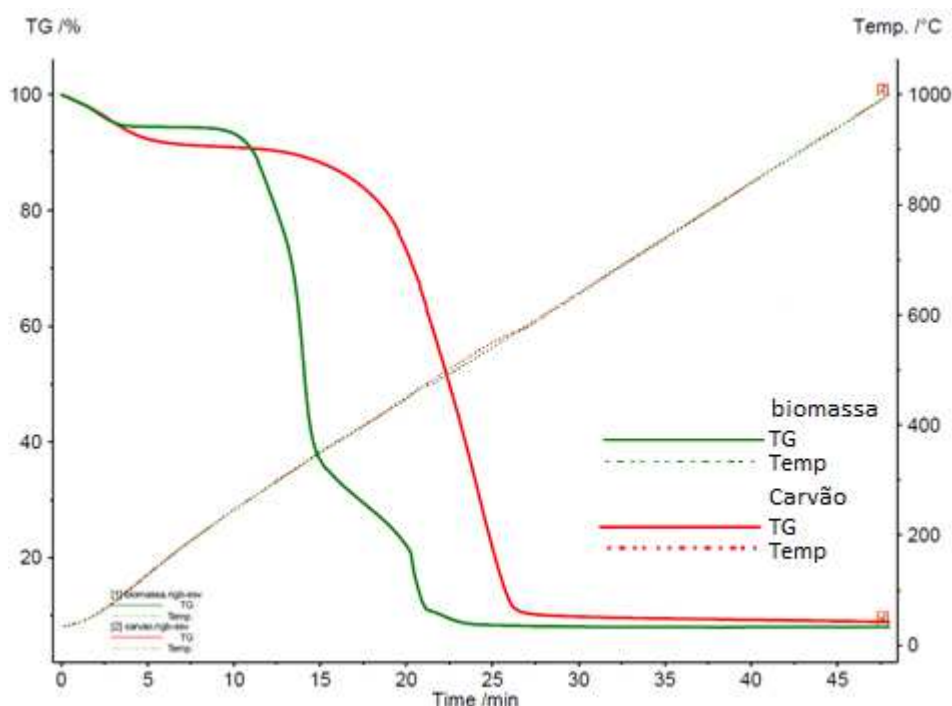
A análise imediata apresentou resultados dos teores de umidade, cinzas e carbono fixo do carvão mineral superiores à biomassa. O teor de matéria volátil da biomassa encontrado foi duas vezes superior ao do carvão mineral. Linhares et al. (2016) encontraram valor do teor de carbono fixo semelhante para os resíduos de casca de acácia e carvão mineral de Candiota, enquanto o teor de cinza do carvão foi muito superior ao da biomassa.

A análise elementar apresentou um resultado de teor de carbono do carvão superior a 75% e para a serragem de eucalipto superior a 50%. O teor de hidrogênio para ambos os combustíveis foi próximo a 5%. O teor de enxofre para a biomassa foi inferior a 0,1% e para o carvão mineral foi próximo a 0,5%. Bianchi (2018) encontrou valores dos teores de carbono próximos a 50% para o carvão mineral CE4500 e para a serragem de pinus. O teor de enxofre para a biomassa foi abaixo de 0,1% enquanto, para o carvão mineral, próximo a 1,3%. O poder calorífico encontrado para o carvão de Pecém foi em torno de 50 % superior ao encontrado para o carvão CE4500 analisado por Bianchi (2018) devido ao menor teor de cinzas do carvão colombiano. O poder calorífico superior da biomassa de eucalipto ficou muito próximo do valor encontrado por Ocanha et al. (2020) para esta mesma biomassa e por Bianchi (2018) para a biomassa de pinus.

4.3 Análise Termogravimétrica

A Figura 4.1 mostra o resultado da análise termogravimétrica (TGA), indicando as curvas de perda de massa em função do tempo durante a combustão das amostras de biomassa de eucalipto e carvão mineral de Pecém.

Figura 4-1 - Decomposição termogravimétrica (TGA) da biomassa de eucalipto e do carvão mineral de Pecém.

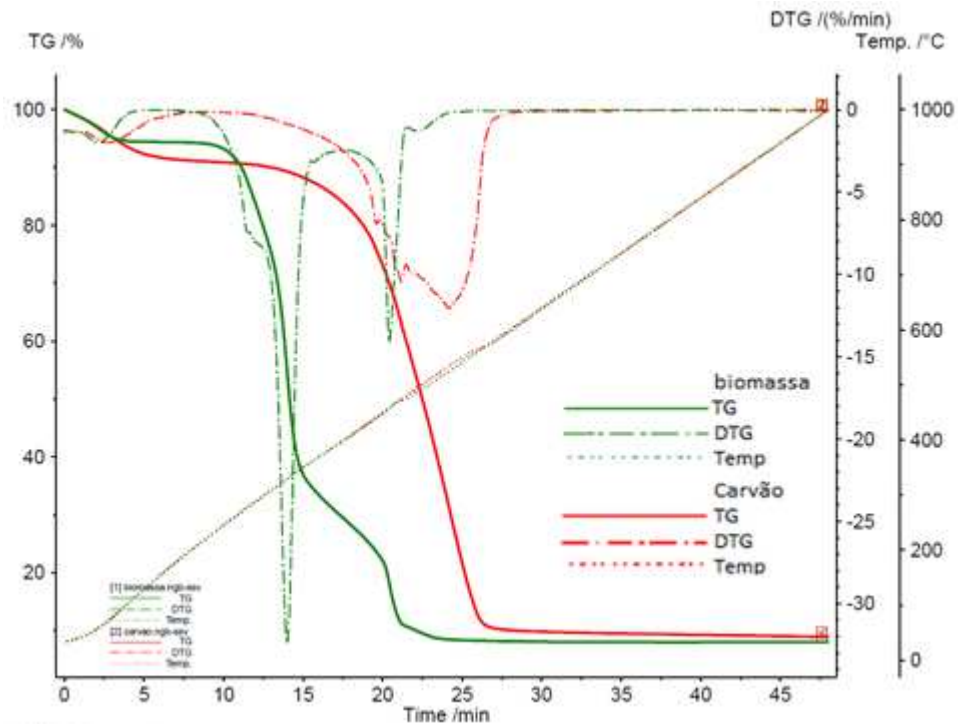


Fonte: O autor.

Na curva, é possível observar a degradação térmica do material ao longo do tempo a partir do incremento da temperatura. A primeira perda de massa corresponde a fase de aquecimento e secagem onde ocorre a desidratação ou perda de umidade do material. Esta fase ocorre até a temperatura de 100°C para ambos os materiais. A segunda fase corresponde a liberação da matéria volátil. Nesta fase, na temperatura de 225 a 400 °C, ocorre a maior perda de massa da biomassa e corresponde a decomposição da celulose e hemicelulose presentes no material. Na terceira fase, a maior parte da massa do carvão mineral é liberada e corresponde à combustão do resíduo carbonoso. Na biomassa, esta fase ocorre a partir de 400 °C e corresponde a degradação da lignina.

Para melhor visualização das etapas de degradação térmica dos combustíveis foi plotada a curva da derivada da TGA, conforme ilustrado na Figura 4.2.

Figura 4-2 - Decomposição termogravimétrica (TGA) e respectiva derivada (DTG) da curva da biomassa de eucalipto e do carvão mineral de Pecém.



Fonte: O autor.

Na primeira curva é possível observar que a perda de umidade para ambos os combustíveis ocorre a tempos e temperaturas muito próximos. O pico maior da curva da derivada, para a biomassa, indica que, a perda de matéria volátil ocorre a velocidades superiores à do carvão mineral e que a maior parte da massa do material é degradada nesta fase. Na terceira etapa observa-se também maior velocidade de oxidação do resíduo carbonoso da biomassa em comparação ao carvão tendo este a necessidade de um maior tempo de residência para a completa conversão térmica.

4.4 Fluidização a Frio das Misturas

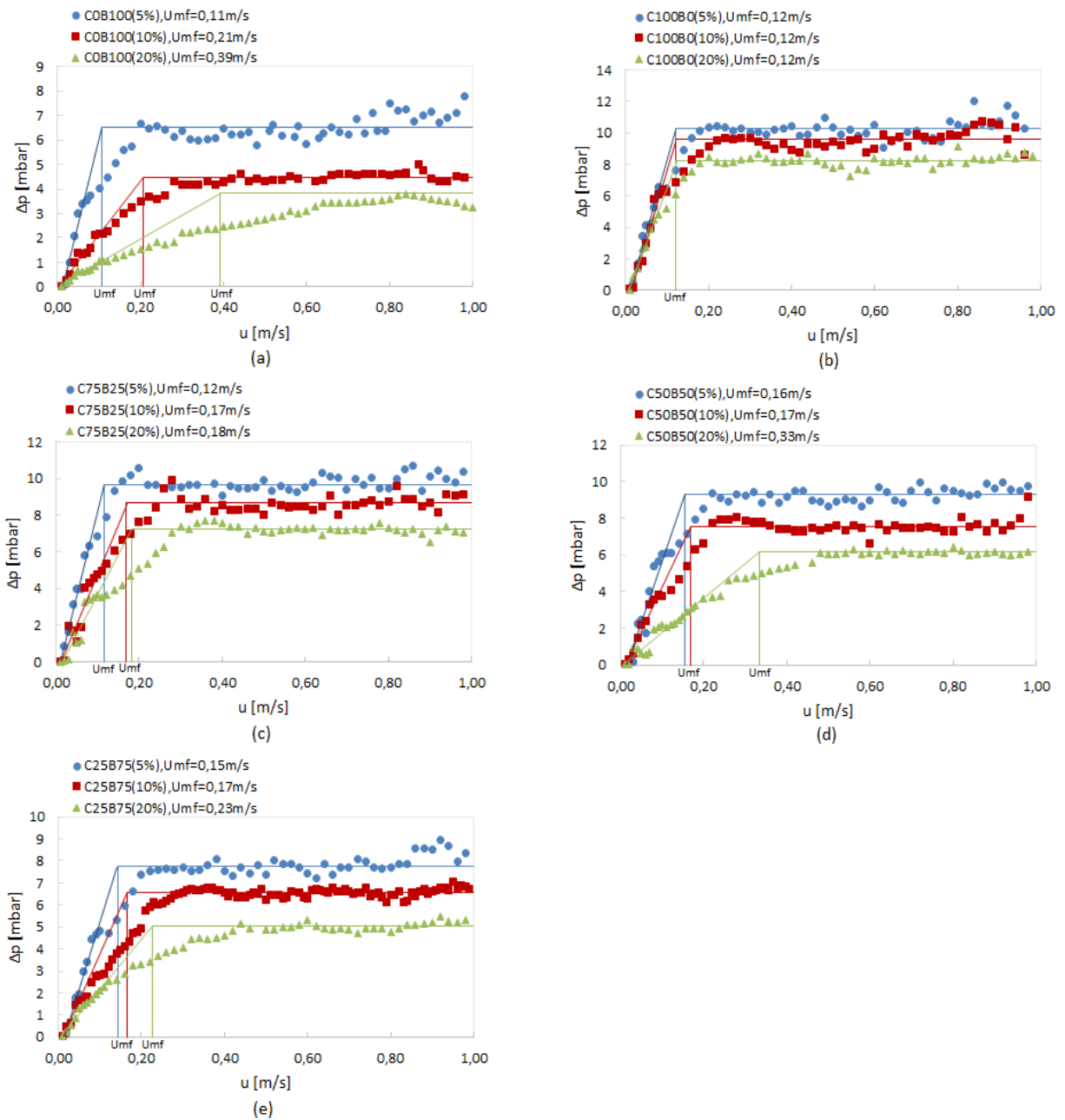
As curvas de defluidização resultantes, para todas as misturas, podem ser observadas na Figura 4.3. As velocidades mínimas de fluidização obtidas destas curvas podem ser visualizadas na Tabela 4.3. Todas as misturas apresentaram um regime de fluidização de leito borbulhante, sem a formação de caminhos preferenciais ou pistonamentos. As misturas com 10 e 20% de biomassa apresentaram pequenas aglomerações e segregação de partículas após a fluidização. A Figura 4.4 mostra um exemplo de segregação de biomassa na superfície do leito para a mistura de razão C25B75 e 20% de mistura em relação a massa total do leito.

Tabela 4-3 - Velocidade mínima de fluidização das misturas.

Material	Mistura	U_{mf} (m/s)
COB100-inerte	1	0,11
	2	0,21
	3	0,39
C100B0-inerte	4	0,12
	5	0,12
	6	0,12
C75B25-inerte	7	0,12
	8	0,17
	9	0,18
C50B50-inerte	10	0,16
	11	0,17
	12	0,33
C25B75-inerte	13	0,15
	14	0,17
	15	0,23

Fonte: O autor.

Figura 4-3 - Curvas de defluidização para as misturas: (a) C0B100 e inerte; (b) C100B0 e inerte; (c) C75B25 e inerte; (d) C50B50 e inerte; (e) C25B75 e inerte.



Fonte: O autor.

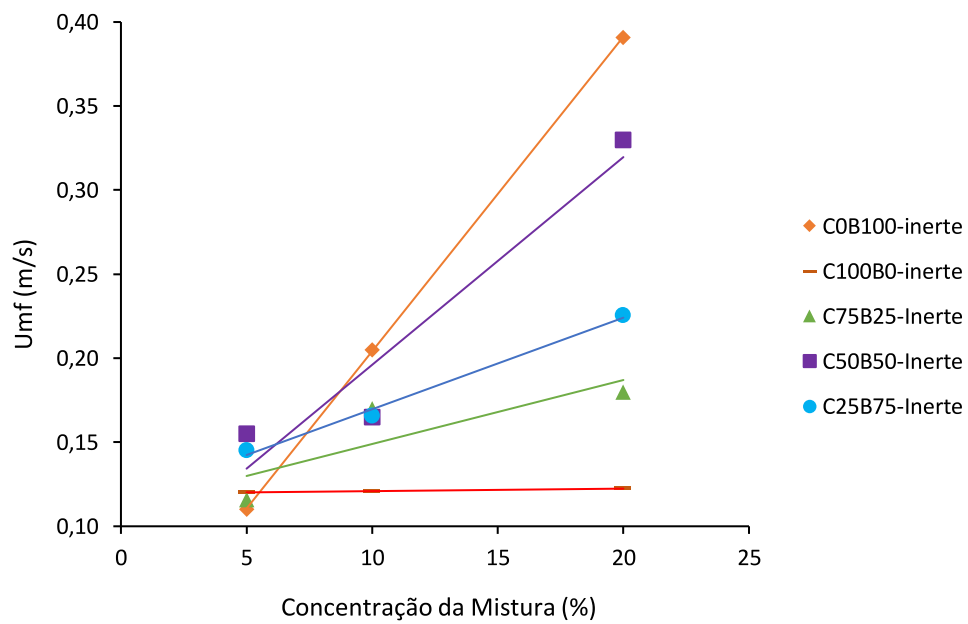
Figura 4-4 - Segregação de biomassa na superfície do leito (Mistura 15).



Fonte: O autor.

A Figura 4.5 ilustra o comportamento da velocidade mínima de fluidização em função da concentração mássica para todas as misturas.

Figura 4-5 - Velocidade mínima de fluidização em função da concentração mássica de cada mistura.



Fonte: O autor.

A velocidade mínima de fluidização, assim como a queda de pressão no leito das misturas contendo apenas carvão e inerte apresentou-se muito semelhante para todas as proporções. Linhares et al. (2016) encontraram este mesmo comportamento em misturas do carvão mineral Candiota e inerte contendo 3, 5 e 10% de carvão em massa. Para todas as misturas contendo biomassa, a velocidade mínima de fluidização foi aumentada com a adição de biomassa. Já o inverso ocorreu à queda de pressão no leito que foi reduzida. Pécora et al. (2013) observaram este aumento na velocidade mínima de fluidização em misturas contendo bagaço de cana, casca de arroz e inerte. De acordo com Ocanha et al. (2020), este comportamento ocorre devido a porosidade do leito que aumenta com o acréscimo da biomassa, fazendo com que haja maior espaço intersticial, exigindo um maior fluxo de ar para superar o peso das partículas e fluidizá-las.

4.5 Condições de Operação do Combustor

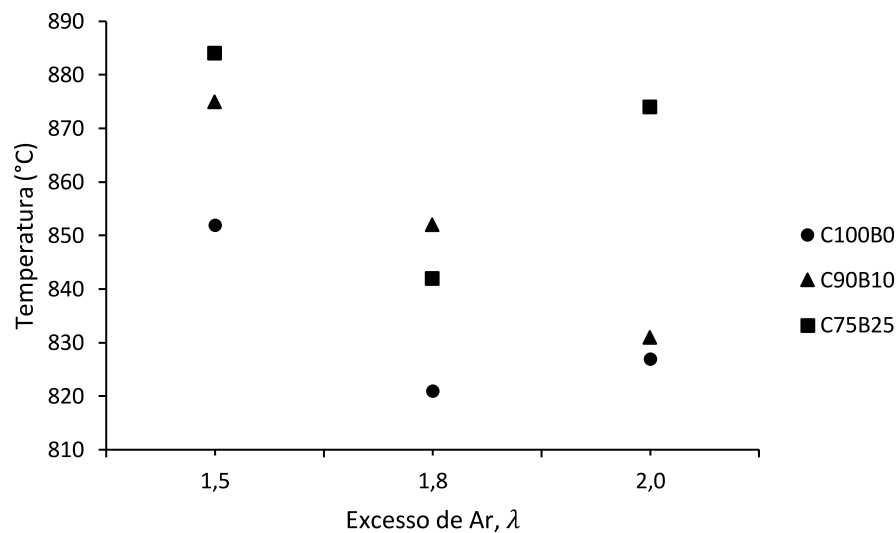
Nos primeiros testes de combustão realizados observou-se obstrução de combustível na descida do duto de alimentação. Ocorreu um aumento de temperatura no duto de alimentação causado por uma combustão indesejada na zona do *freeboard*. Este aumento de temperatura causou a devolatilização de parte do combustível no interior do duto, formando aglomerações de combusto em suas paredes e impedindo a descida do material ao leito. O ocorrido foi observado para qualquer percentual de biomassa na mistura. A solução encontrada para a resolução do problema foi a inserção de um pequeno duto de ar comprimido próximo a região de ocorrência da combustão, tendo este a função de resfriar o duto de alimentação bem como facilitar o deslocamento do combustível ao interior do leito.

Também ocorreram flutuações de pressão condicionadas à rede de ar comprimido, sendo necessário o constante monitoramento e ajuste manual do rotâmetro de ar primário.

Devido à imprecisão de alimentação, principalmente nas misturas com maiores volumes de biomassa, toda massa foi medida antes de colocada no silo de alimentação, bem como foi medido o tempo necessário para consumir essa massa. Assim, foi possível saber a taxa de massa de combustível que foi alimentada no reator em cada teste. Este fato se deve ao arraste de uma porção considerável de material de baixo peso específico ao leito pela entrada de ar ambiente no alimentador devido à pressão negativa em seu interior, fator que não havia sido considerado nos testes de calibração a frio.

As temperaturas no interior do leito, em regime permanente de operação, variaram de 825 °C, com somente carvão mineral e $\lambda = 2$, à 885 °C, para misturas com 25% de biomassa e $\lambda = 1,5$, utilizando $3 U_{mf}$, conforme pode ser observado na Figura 4.6.

Figura 4-6 - Temperatura do leito em função do excesso de ar para as misturas estudadas.

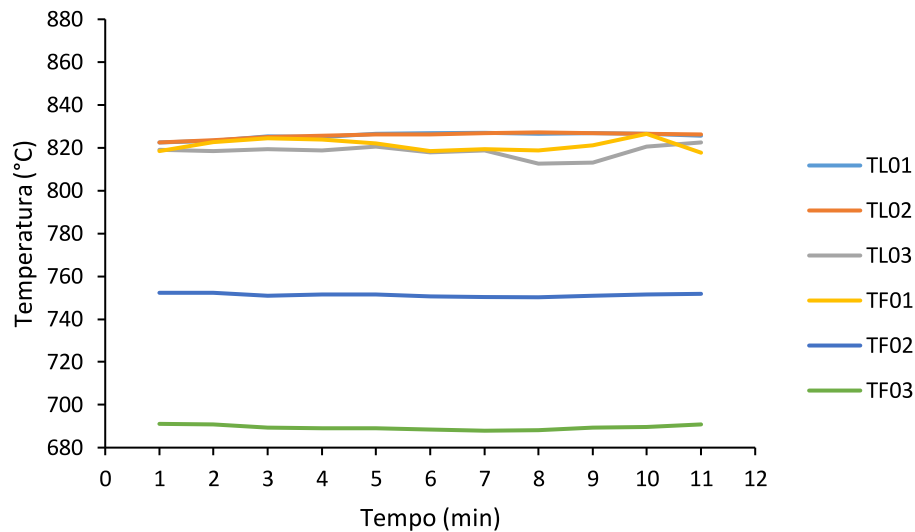


Fonte: O autor.

Observa-se que o acréscimo de biomassa na mistura tende a elevar a temperatura do leito. Isso pode ser explicado pelo elevado conteúdo de material volátil da biomassa, pela sua elevada velocidade de devolatilização, conforme visto no TGA e sua menor quantidade de cinzas em relação ao carvão mineral. Também pode-se observar que a elevação do excesso de ar tende a atenuar a temperatura pois o calor liberado pelo combustível (PCI) que permanece o mesmo é usado para aquecer uma maior massa de componentes inertes (N_2) e de O_2 que não reagiu. Wander et al. (2020) utilizaram biomassa de pinus e carvão mineral de baixo rank com 37% de cinzas neste mesmo reator. Os resultados mostraram que, o aumento da temperatura média do sistema se elevou com o aumento da fração de biomassa na mistura. Os autores concluíram que, isso ocorre, principalmente devido às menores concentrações de material inerte (cinzas) da biomassa quando comparada ao carvão mineral.

A Figura 4.7 apresenta um perfil típico de temperatura ao longo do combustor para a combustão singular do carvão mineral, $\lambda = 2$ e $3 U_{mf}$.

Figura 4-7 - Perfil de temperatura ao longo do tempo. (C100B0, $\lambda = 2, 3 U_{mf}$).



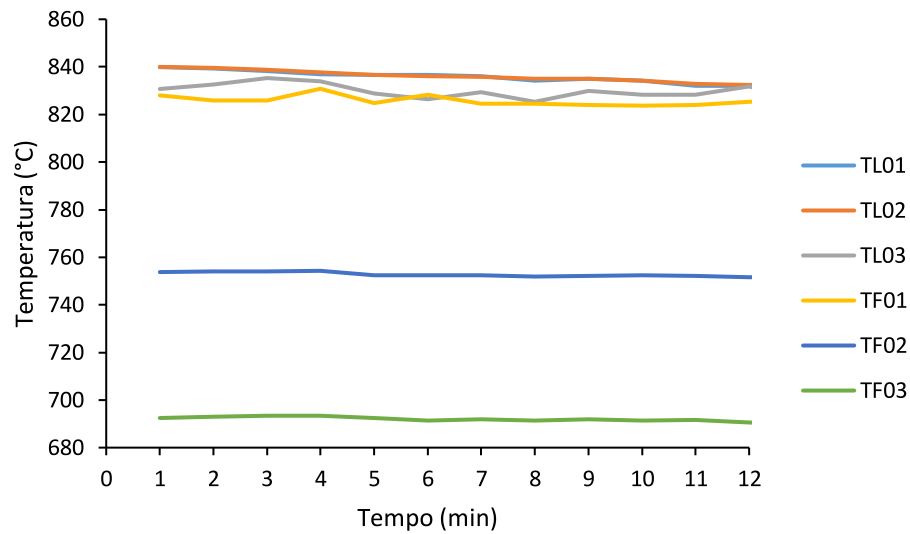
Fonte: O autor.

Os termopares TL01 e TL02 encontram-se imersos no leito de partículas a uma distância de, respectivamente, 75 mm e 200 mm acima do distribuidor. O termopar TL03 encontra-se um pouco acima do leito e abaixo do duto de alimentação, a uma distância de 320 mm acima do distribuidor. O termopar TF01 é o primeiro acima do duto de alimentação, na zona do *freeboard*, a uma distância de 720 mm acima do distribuidor. Os termopares TF02 e TF03, também na zona do *freeboard*, estão a 1170 mm e 1600 mm, respectivamente acima do distribuidor.

Pela Figura 4.7, pode-se observar que a temperatura ao longo do leito, também chamada de zona densa (TL01 e TL02), praticamente não se altera. Já na região acima do leito ou zona diluída, (TL03 e TF01) a temperatura é um pouco mais baixa, isso ocorre devido a entrada de combustível e ar comprimido a temperaturas ambientes. Nas regiões mais altas do *freeboard* (TF02 e TF03) a temperatura também se mantém estável, entretanto significativamente mais baixa em comparação a zona de combustão, isso ocorre, fundamentalmente, pela ineficiência do isolamento fazendo com que o calor se dissipe para o exterior do equipamento.

A Figura 4.8 apresenta um perfil típico de temperatura ao longo do combustor para a razão C90B10, $\lambda = 2$ e $3 U_{mf}$.

Figura 4-8 - Perfil de temperatura ao longo do tempo. (C90B10, $\lambda = 2, 3 U_{mf}$).

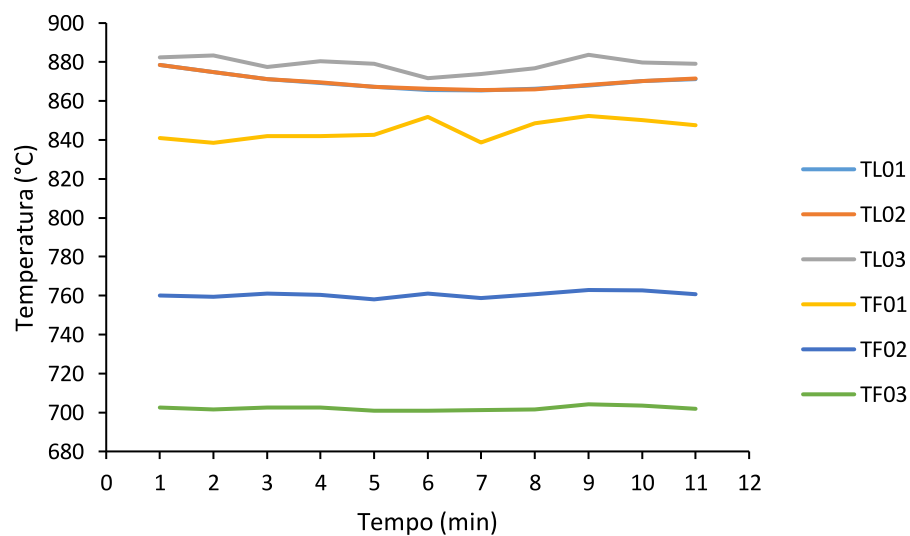


Fonte: O autor.

Na Figura 4.8 observa-se um pequeno e esperado incremento de temperatura na região do leito devido ao acréscimo de 10% de biomassa na mistura. Embora no leito seja aumentada, a temperatura na zona diluída (TL03, TF01, TF02 e TF03) praticamente não é alterada em comparação à combustão singular do carvão mineral.

A Figura 4.9 apresenta um perfil típico de temperatura ao longo do combustor para uma razão de C75B25, $\lambda = 2$ e $3 U_{mf}$.

Figura 4-9 - Perfil de temperatura ao longo do tempo. (C75B25, $\lambda = 2, 3 U_{mf}$).



Fonte: O autor.

Para a razão C75B25, apresentada na Figura 4.9, também é possível verificar que, a temperatura da zona densa é bastante próxima ao longo de todo o leito. A mudança observada é que a temperatura no início da zona diluída (TL03) torna-se mais alta em relação a zona densa (TL01 e TL02). Isso explica-se pelo fato de que boa parte do conteúdo volátil da biomassa é liberado antes mesmo de atingir a região do leito. Uma pequena oscilação de temperatura também pode ser observada no termopar TF01, que pode estar relacionada ao arraste indesejado de finos para o interior do reator devido a variações na alimentação.

4.6 Emissões

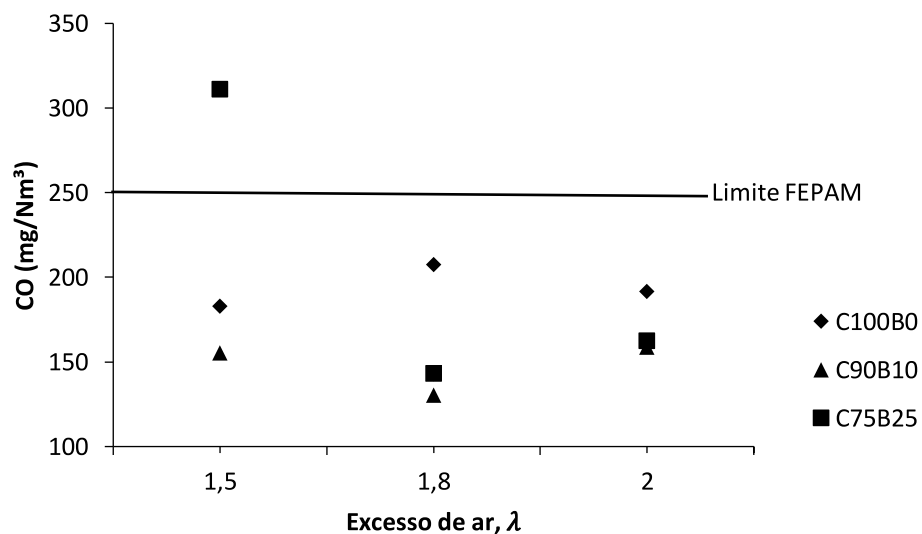
Neste tópico foram avaliados os resultados encontrados de emissões dos gases CO, CO₂, NO e SO₂.

A FEPAM é o órgão, no Rio Grande do Sul, responsável por delimitar e fiscalizar as emissões máximas para empresas que utilizam a combustão em seus processos industriais.

Conforme já abordado, a presença de CO nos gases de exaustão é um indício de uma combustão incompleta, portanto, quanto mais elevada for a sua concentração, menor será a eficiência e qualidade desta combustão.

A Figura 4.10 apresenta as medições de CO realizadas, durante os testes de co-combustão, para as razões C100B0, C90B10, C75B25, utilizando excessos de ar de 50, 80 e 100% e $3 U_{mf}$, considerando um percentual corrigido de 6% de O₂.

Figura 4-10 - Concentração de CO em função do excesso de ar ($3 U_{mf}$, 6% de O₂).

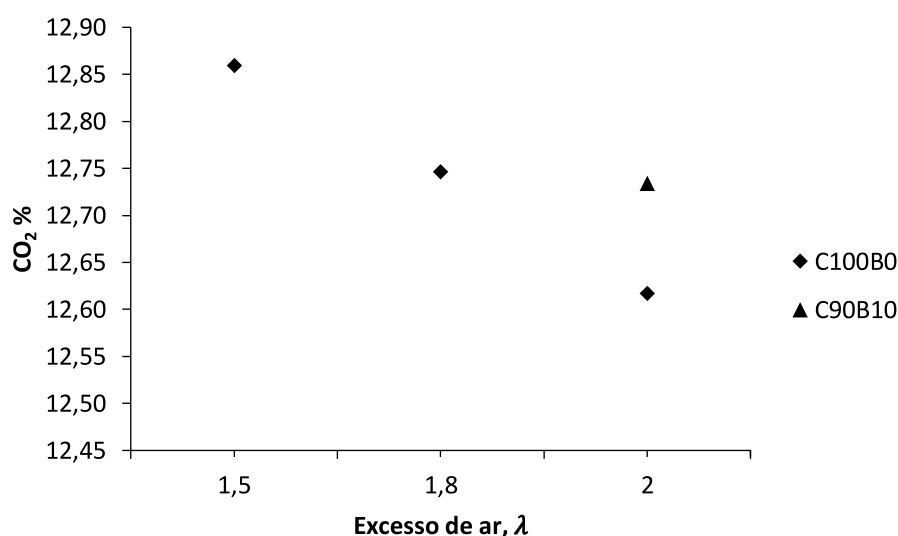


Fonte: O autor.

Pela figura, é possível observar que, para a maioria dos testes, a presença de CO ficou abaixo dos limites máximos normatizados pela FEPAM para plantas com potência térmica nominal entre 500 e 1000 MW, o que indica uma eficiência de conversão dos elementos combustíveis satisfatória. Apenas para a medição realizada para a razão C75B25 e $\lambda = 1,5$, ocorreu uma alta concentração de CO nos gases de exaustão, o que pode indicar uma possível combustão incompleta dos voláteis da biomassa liberados na região do *freeboard*. Para todas as outras misturas e excessos de ar, a formação de CO ficou abaixo dos limites máximos de emissões. Quando comparada a combustão singular do carvão mineral, exceto pelo teste de razão C75B25 e $\lambda = 1,5$, o acréscimo de biomassa levou a uma pequena redução na emissão de CO, indicando uma combustão mais completa.

A Figura 4.11 mostra o teor de CO₂ medido nos testes com combustão singular de carvão mineral e com razão C90B10, $\lambda = 2$ e $3 U_{mf}$, ajustado ao teor de 6% de O₂.

Figura 4-11 - Concentração de CO₂ em função do excesso de ar ($3 U_{mf}$, 6% de O₂).



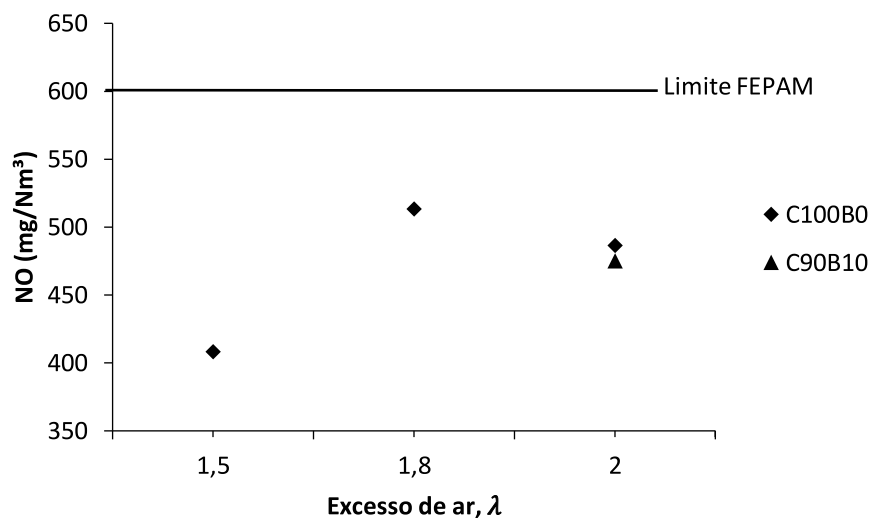
Fonte: O autor.

Para o composto CO₂, conforme o esperado, ocorreu o inverso do comportamento do CO, pois uma maior quantidade de CO₂ nos gases de exaustão indica uma melhor conversão térmica dos elementos combustíveis. Para a combustão singular do carvão mineral observou-se uma pequena tendência de queda no teor de CO₂ conforme elevação do excesso de ar. Tal fato pode estar relacionado a um menor tempo de residência a maiores excessos de ar, o que não favorece a combustão completa do combustível. Para a condição $\lambda = 2$ e razão C90B10, pode-se observar um percentual de formação de CO₂ mais próximo da condição teórica ideal

(aproximadamente 13,5%, para 6% de O_2), o que era esperado pois a biomassa apresenta mais oxigênio em sua composição quando comparada ao carvão mineral. Tal indicativo também sugere que houve uma melhor eficiência da co-combustão em relação a combustão singular do carvão mineral para esta mesma condição.

Os gases NO e SO_2 foram medidos comparando a combustão singular de carvão mineral com a razão C90B10 de mistura, $\lambda = 2$ e $3 U_{mf}$, conforme a Figura 4.12 e Figura 4.13.

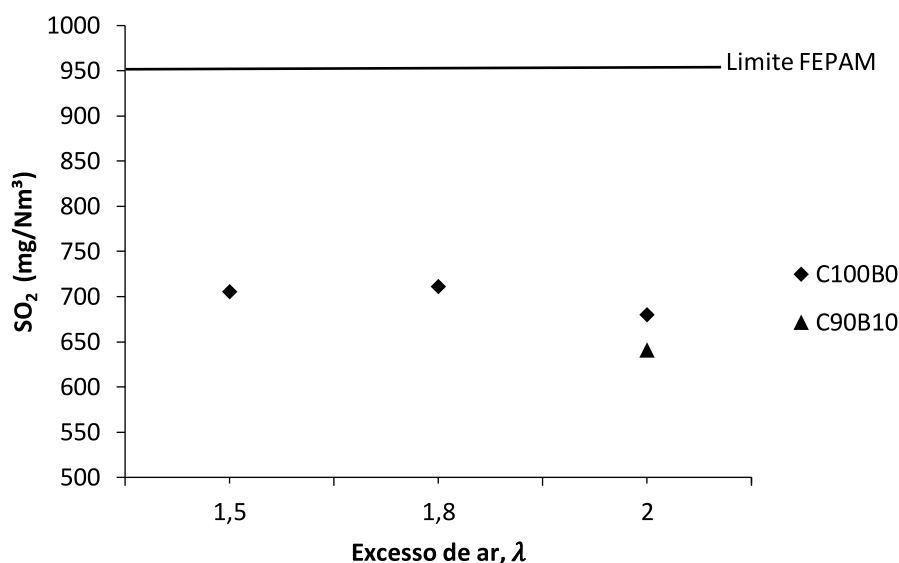
Figura 4-12 - Concentração de NO em função do excesso de ar ($3 U_{mf}$, 6% de O_2).



Fonte: O autor.

Para a combustão singular do carvão mineral observou-se que, o aumento do excesso de ar elevou a emissão de NO, entretanto, todas as emissões ficaram abaixo do limite estipulado pela legislação ambiental. A adição de 10% de biomassa ao processo, na condição de $\lambda = 2$ se mostrou favorável tendo em vista que houve leve redução nas emissões de NO, ficando também abaixo dos limites estabelecidos pela FEPAM. Tal fato pode ser explicado pela baixíssima concentração de nitrogênio na biomassa utilizada. A baixa temperatura utilizada no processo também pode ser considerado um fator altamente relevante para estas baixas emissões visto que a formação de NO térmico torna-se favorecida a temperaturas acima de $1540^\circ C$ (MORRISON, 1980 apud BASU, 2006). Gong et al. (2019) verificaram que as emissões totais de NO aumentaram de acordo com o aumento do excesso de ar e temperatura do leito e diminuíram com a pressão de operação.

Figura 4-13 - Concentração de SO₂ em função do excesso de ar (3 U_{mf} , 6% de O₂).



Fonte: O autor.

Para a combustão singular do carvão mineral, diferentemente do composto NO, a concentração de SO₂ mostrou uma leve tendência de queda com a elevação do excesso de ar. Com a utilização de co-combustão com 10% de biomassa e 100% de excesso de ar uma pequena redução das emissões do gás pode ser observada. Conforme o esperado, as baixas concentrações do elemento enxofre no carvão mineral e na biomassa testados não favorecem a formação do gás SO₂. Em todos os testes realizados, as emissões do gás SO₂ não ultrapassou os valores estipulados pelo órgão ambiental. Wander et al. (2020) observaram aumento nas concentrações de SO₂ conforme aumento da velocidade mínima de fluidização, sugerindo que a maior turbulência do leito pode favorecer a formação deste composto. Unchaisri et al. (2017) observaram que a alta concentração de CO a excessos de ar mais baixos, devido à baixa eficiência de combustão, pode favorecer as reações de redução de NO_x e que o oposto ocorre a maiores excessos de ar devido ao efeito de resfriamento. A baixa temperatura de combustão, que geralmente ocorre a excessos de ar mais elevados, diminui a formação do composto SO₂. Os autores concluíram que as emissões dos compostos NO_x e SO₂ dependem fortemente da concentração dos elementos N e S do combustível.

4.7 Caracterização das Cinzas por Perda ao Fogo

Para ajudar na avaliação da qualidade de combustão, as cinzas retiradas do ciclone foram submetidas ao ensaio de perda ao fogo. O ensaio seguiu a Norma NM/2004 – cimento Portland

– Análise Química – Determinação de Perda ao Fogo, onde as amostras, já secas, foram levadas à mufla a uma temperatura de 950 °C, até atingir massa constante.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos no ensaio de perda ao fogo realizado.

Tabela 4-4 - Perda ao fogo das amostras de material retido no ciclone.

Amostra	Perda em massa (%)
C100B0	18,29
C90B10	28,17
C75B25	56,93

Fonte: O autor.

Pela tabela, é possível verificar uma quantidade considerável de combustível presente junto as cinzas do ciclone que é aumentada em razões com maior percentual de biomassa. Tal fato pode ser um indicativo de que houve um arraste das partículas antes de atingirem um adequado tempo de residência no leito. A baixa granulometria do combustível e a baixa massa específica da biomassa aliadas a intermitência de alimentação são as causas mais prováveis da ocorrência deste arraste de material. A utilização de um reator em leito fluidizado circulante pode ser a solução quando se utiliza partículas de baixa massa específica e granulometrias reduzidas, pois, neste tipo de reator há o reaproveitamento das partículas elutriadas da câmara de combustão.

5 CONCLUSÕES

Após avaliação dos resultados é possível concluir que, em relação ao comportamento fluidodinâmico do leito a frio, apesar da utilização de partículas com massas específicas distintas, o uso de tamanhos médios de partículas mais próximos entre si ajudou a tornar o leito menos heterogêneo na fluidização. A fluidização de todas as misturas apresentou um comportamento fluidodinâmico padrão de leito borbulhante, não evidenciando caminhos preferenciais ou pistonamentos. A elutriação de grande parte das partículas de biomassa, em misturas com razões a partir de 10%, fez com que houvesse segregação de biomassa na parte superior do leito. A velocidade mínima de fluidização aumentou à medida que maiores proporções de biomassa foram adicionadas à mistura. Tal comportamento pode ser explicado devido a porosidade do leito ser aumentada com o acréscimo de biomassa, fazendo com que um maior fluxo de ar permeie o leito até a fluidização completa das partículas.

Os resultados de análise imediata e elementar do carvão mineral de Pecém indicam se tratar de um combustível de baixo teor de cinza (aproximadamente 7%) e de elevado teor de carbono fixo (52,9%), fato que explica o seu elevado poder calorífico (28,1 MJ/kg), características energéticas desejáveis para a geração termoelétrica. O baixo teor de cinza do carvão mineral e da biomassa encontrados no teste de análise imediata são aspectos bastante favoráveis pois diminuem a necessidade de grandes investimentos em sistemas para abatimentos de particulados quando da utilização destes materiais para aproveitamento energético.

Nos testes de co-combustão, as temperaturas do leito se mantiveram estáveis, entre 800 e 900 °C, para todas as misturas e excessos de ar analisados. A adição de biomassa na mistura elevou a temperatura média do leito, fato que pode ser explicado devido a rápida devolatilização do conteúdo volátil da biomassa, verificados nos testes de TGA e ao seu baixo teor de cinzas quando comparada ao carvão mineral. Os testes com maiores excessos de ar operaram sob temperaturas mais amenas, o que se explica devido a entrada de uma maior massa de ar frio ao longo do reator. Na região do *freeboard* foram observadas flutuações de temperatura, principalmente na mistura com 25% de biomassa. Isto ocorreu, pois, grande parte das partículas de biomassa, devido a sua baixa granulometria e massa específica, foram arrastadas para fora do reator antes de sua completa combustão. Tal observação foi reforçada pelos testes de perda ao fogo onde mais de 50% de combustível foi encontrado nas cinzas do ciclone.

Com exceção do teste de razão C75B25 e $\lambda = 1,5$, o acréscimo de biomassa levou a uma pequena redução na emissão de CO quando comparada a combustão singular do carvão mineral, indicando uma combustão mais completa.

O teor de CO₂ mais próximo do teórico máximo com acréscimo de 10% de biomassa e 100% de excesso de ar, indicou uma melhora na eficiência da combustão dessa mistura quando comparada a combustão do carvão mineral.

A co-combustão da mistura de razão C90B10 e $\lambda = 2$ resultou em uma leve redução nas emissões dos gases NO e SO₂, o que pode ser explicado pelo mais baixo teor dos elementos N e S presentes na biomassa. O NO apresentou elevação de emissões a excessos de ar mais elevados enquanto a emissão de SO₂ foi reduzida a temperaturas mais amenas, em consequência do efeito de resfriamento. Embora a co-combustão não tenha apresentado ganhos significativos quanto às emissões dos gases NO e SO₂, ela também não desfavorece a sua aplicação tendo em vista a substituição de um combustível de valor comercial agregado por um resíduo industrial muitas vezes subaproveitado.

Com os resultados obtidos no presente estudo foi possível concluir que a co-combustão em leito fluidizado borbulhante do carvão mineral de Pecém com a biomassa de eucalipto se mostrou bastante favorável tanto no comportamento fluidodinâmico do leito quanto na estabilidade operacional do reator e emissões de gases para as razões estudadas. Entretanto, para razões de biomassa, em massa a partir de 25% algumas desvantagens operacionais foram observadas, como o elevado arraste de partículas para fora do reator que ficou comprovado pelas flutuações de temperatura na região do *freeboard* e pelo teste de perda ao fogo das cinzas do ciclone onde mais de 50% de material combustível foi encontrado.

Sugere-se para trabalhos futuros estudar alternativas que minimizem o problema de arraste de material. A utilização de partículas maiores, de um pré-tratamento da biomassa, como por exemplo a torrefação e a calibração do alimentador nas mesmas condições de operação do reator são alternativas que podem solucionar o problema deste arraste indesejável das partículas. A opção pela utilização de um reator em leito fluidizado circulante também surge como alternativa devido ao reaproveitamento das partículas arrastadas neste tipo de reator. Outra sugestão para estudos futuros é analisar as características da cinza quanto aos elementos que a compõe visando o seu reaproveitamento.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C604**: Standard Test Method for True Specific Gravity by Gas-Comparison Pycnometer. West Conshohocken, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D6761**: Standard Test Method for Determination of the Total Pore Volume of Catalysts and Catalyst Carriers. West Conshohocken, 2012.
- ANEEL AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br>. Acesso em 8 jan. 2020.
- ARAÚJO, D. DE S. S. **Co-Combustão de Biomassa e Carvão em Leito Fluidizado: Impactes nas emissões atmosféricas de NO_x, SO₂, CO, Dioxinas e Furanos e Material Particulado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa Faculdade de Ciências e Tecnologia, p. 141, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM-ISO 3310-1**: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8289** - Carvão mineral - Determinação do teor de cinzas.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8290** - Carvão mineral - Determinação do teor de materiais voláteis.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8293** - Carvão mineral - Determinação de umidade.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8631** - Carvão mineral – Análise elementar.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 18/2004**: Cimento Portland – Análise Química – Determinação de Perda ao Fogo. Rio de Janeiro, 2004.
- ATAÍDE CH, Cardoso CR, Oliveira TJ. Bubbling fluidization of biomass and sand binary mixtures: minimum fluidization velocity and particle segregation. **Chem Eng Process: Process Intensification** 2013 72 113e21, disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cep.2013.06.010>.
- BARTELS, M., LIN, W., NIJENHUIS J., KAPTEIJN, F., OMMEN, J.R., Agglomeration in fluidized beds at high temperatures: mechanisms, detection and prevention, **Prog. Energy Combust. Sci.** 34 (2008) 633–666.
- BASU, P. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. Boca Raton: CRC Press, 2006. 496 p.
- BAZZO, E., **Geração de Vapor**, 2nd Ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

BIANCHI, F.M. “**Estudo da Coqueima de Carvão Mineral Brasileiro e Biomassa Utilizando Leito Fluidizado Borbulhante em Escala de Bancada**”. 72p., 2018. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **BEN - Balanço Energético Nacional**. Brasil, 2019. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioSintese2019.aspx>>. Acesso em: 17 dez. 2019.

CARVALHO, J.A, LACAVA, P.T, **Emissões em Processos de Combustão**, São Paulo: Editora UNESP, 2003.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução Nº 436**, de 13 de maio de 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=660>> Acesso em 14 abr. 2020.

CORTEZ, L. A. B, LORA, E.E.S, GÓMEZ, E.O., **Biomassa Para Energia**. Campinas: Ed. UNICAMP, 2009.

FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIS ROESSLER **Diretriz Técnica Nº01/2018**, de 24 de outubro de 2018. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/CENTRAL/DIRETRIZES/DIRET_TEC_01_2018.PDF> Acesso em 12 jun. 2020.

FOTOVAT, F.; CHAOUKI, J.; BERGTHORSON, J. The effect of biomass particles on the gas distribution and dilute phase characteristics of sand–biomass mixtures fluidized in the bubbling regime. **Chemical Engineering Science**, Amsterdam, v. 102, p. 129–138, Oct 2013, disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.07.042>>.

GARCIA, R. **Combustíveis e Combustão Industrial**. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

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

GENEHR, G.A., DA SILVA, Á.R.S., INDRUSIAK, M.L.S, ZINANI, F.S.F. Fluidization of binary mixtures of biomass and coal with sand: an experimental study. **J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.** 42, 289 (2020). Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40430-020-02380-9>>.

GONG Z, SHAO Y, PANG L, ZHONG W, CHEN C. Study on the emission characteristics of nitrogen oxides with coal combustion in pressurized fluidized bed. **Chinese Journal of Chemical Engineering**. 2019; 27(5): 1177-1183. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.07.020>

GUO, F., ZHONG, Z., Co-combustion of anthracite coal and wood pellets: Thermodynamic analysis, combustion efficiency, pollutant emissions and ash slagging, **Environmental Pollution**, Volume 239, 2018, Pages 21-29, ISSN 0269-7491, disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.004>.

HOFFMANN B. S., SZKLO A., SCHAEFFER, R. An evaluation of the Techno economic potential of co-firing coal with woody biomass in thermal power plants in the south of Brazil, **Biomass and Bioenergy**, Volume 45, 2012, Pages 295-302, ISSN 0961-9534, disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.06.016>.

IEA - International Energy Agency. Key Renewable Trends. Paris, 2017. Disponível em: <<https://www.iea.org/dataandstatistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Coal%20production%20by%20type>>. Acesso em 15 jan. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 1928**: Solid mineral fuels - Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method and calculation of net calorific value. Genebra, 2009.

KHAN, A. A.; DE JONG, W.; JANSSENS, 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.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2. ed. Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 1991.

LAGEMANN, V. **Combustão em Caldeiras Industriais - Óleo & Gás Combustível**. p. 282, 2016.

LINHARES, F.A., **Avaliação fluidodinâmica e processo de co-combustão de resíduo de casca de acácia negra com carvão mineral em planta piloto de leito fluidizado borbulhante** 2016. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2016.

LINHARES, F.A., GOMES, G.F., MARCÍLIO, N.R., MELO, P.J. 2016. “Avaliação Fluidodinâmica e Co-Combustão de Resíduo de Biomassa Industrial em Planta de Bancada e Planta Piloto de Leito Fluidizado Borbulhante” **7º Forum Internacional de Resíduos Sólidos**, 10p. 2016.

LOURENÇO, J. B. **Estudo das características fluidodinâmicas de misturas da madeira de eucalipto e do caroço do fruto do tucumã com inerte visando aplicação em processos de termoconversão**. 2012. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

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

MICHELOTTO, D. D. A. **Análise Fluidodinâmica da Variação da Razão de Aspecto de Partículas Cilíndricas em Leito Fluidizado**. 2018. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 2018.

MILLER, B.G, TILLMAN, D.A., **Combustion Engineering Issues for Solid Fuel Systems**. Burlington, MA: Academic Press, 2008.

MODOLO, R.C.E. TARELHO, L.A.C., TEIXEIRA, E.R., FERREIRA, V.M., LABRINCHA, J.A. Treatment and use of bottom bed waste in biomass fluidized bed combustors, **Fuel Processing Technology**, Volume 125, 2014, Pages 170-181, ISSN 0378-3820, disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.03.040>.

NINDUANGDEE, P., KUPRIANOV, V.I. Fluidized bed co-combustion of rice husk pellets and moisturized rice husk: The effects of co-combustion methods on gaseous emissions,

Biomass and Bioenergy, Volume 112, 2018, Pages 73-84, ISSN 0961-9534, disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.016>.

OCANHA, E. S. **Estudo de Fluidização de Biomassas Lignocelulósicas e de suas Características Físicas, Químicas e Morfológicas**. 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 2018.

OCANHA, E.S, ZINANI, F.S.F., MODOLO, R.C.E, SANTOS, F.A. Assesment of the effects of chemical and physical parameters in the fluidization of biomass and sand binary mixtures through statistical analysis **Energy**, V.190,2020, disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116401>>.

OKA, S. N. **Fluidized Bed Combustion**. New York: Marcel Dekker, 2004.

OLATUNDE, G., FASINA, O., MCDONALD, T.P., DUKE, S.R. Size measurement method for Loblolly Pine grinds and influence on predictability of fluidization. **Canadian Biosystems Engineering Journal**, Winnipeg, Volume 58, p. 78-89, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.7451/CBE.2016.58.4.1>>.

PAUDEL, B.; FENG, Z.-G. Prediction of minimum fluidization velocity for binary mixtures of biomass and inert particles. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 237, p. 134-140, March 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.031>>

PÉCORA, 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.

RHODES, M. **Introduction to Particle Technology**, 2nd Ed. London: John Wiley & Sons Ltd, 2008.

ROSENDAHL, L. **Biomass Combustion Science, Technology and Engineering**, Philadélphia: Woodhead Publishing.2013.

SAHU, S. G.; CHAKRABORTY, N.; SARKAR, P. Coal-biomass co-combustion: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 575–586, 2014.

SILVA, A.R.S.S, **Modelagem Experimental e Computacional Dem-Cfd da Fluidização de Partículas Geldart-D com Formato Irregular**. 2019. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 2019.

TANNOUS, K. LAM, P.S., SOKHANSANJ, S., GRACE, J.R. Physical Properties for Flow Characterization of Ground Biomass from Douglas Fir Wood. **Particulate Science and Technology**, London, n. 31, p. 291–300, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/02726351.2012.732676>>.

TARELHO, L.A.C., NEVES, D.S.F., MATOS, M.A.A., Forest biomass waste combustion in a pilot-scale bubbling fluidised bed combustor, **Biomass and Bioenergy**, Volume 35, Issue 4, 2011, Pages 1511-1523, ISSN 0961-9534, disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.052>>.

TURNES, S.R. **Introdução à Combustão: Conceitos e Aplicações** 3ªEd. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

UNCHAISRI, T., SUNEERAT F., Co-firing of coal and rice straw pellet in a circulating fluidized-bed reactor, **Energy Procedia**, Volume 138, 2017, Pages 766-771, ISSN 1876-6102, disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.051>>.

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

WANDER, P.R, BIANCHI, F.M., CAETANO N.R., KLUNK M.A., INDRUSIAK M.L.S., Cofiring low-rank coal and biomass in a bubbling fluidized bed with varying excess air ratio and fluidization velocity, **Energy**, Volume 203, 2020, 117882, ISSN 0360-5442, disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117882>>.

WEN, C.Y.; YU, Y.H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity. **AICHE Journal**, n. 12, p. 610–612, 1966. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/aic.690120343>>.

XUE, Z., ZHONG, Z., LAI X., Investigation on gaseous pollutants emissions during co-combustion of coal and wheat straw in a fluidized bed combustor, **Chemosphere**, Volume 240, 2020, 124853, ISSN 0045-6535, disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117882>>.