

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL
UNIDADE UNIVERSITÁRIA EM PORTO ALEGRE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

VICTOR HUGO ANDREIS SEBEN

**IMPLEMENTAÇÃO DE PLANTA DE PIRÓLISE DE BAIXO CUSTO EM ESCALA
LABORATORIAL PARA PROCESSAMENTO DE BIOMASSA RESIDUAL E
DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PRODUTOS**

PORTO ALEGRE

2023

VICTOR HUGO ANDREIS SEBEN

**IMPLEMENTAÇÃO DE PLANTA DE PIRÓLISE DE BAIXO CUSTO EM ESCALA
LABORATORIAL PARA PROCESSAMENTO DE BIOMASSA RESIDUAL E
DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PRODUTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como requisito parcial de obtenção
do título de Bacharel em Engenharia de Energia
na Universidade Estadual do Rio Grande do
Sul.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Lúcia Allebrandt da
Silva Ries

Coorientador: Prof. Dr. Fabiano Perin Gasparin

PORTO ALEGRE

2023

Catálogo de publicação na fonte (CIP)

S443i Sebben, Victor Hugo Andreis

Implementação de planta de pirólise de baixo custo em escala laboratorial para processamento de biomassa residual e desenvolvimento de novos produtos / Victor Hugo Andreis Sebben. – Porto Alegre: Uergs, 2023.

68 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Curso Superior de Engenharia de Energia (Bacharelado), Unidade em Porto Alegre, 2023.

Orientadora: Profa. Dra. Lúcia Allebrandt da Silva Ries

Coorientador: Prof. Dr. Fabiano Perin Gasparin

1. Biochar. 2. Reator de pirólise. 3. Reaproveitamento de resíduos. 4. Trabalho de Conclusão de Curso. I. Ries, Lúcia Allebrandt da Silva. II. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Curso Superior de Engenharia de Energia (Bacharelado), Unidade em Porto Alegre, 2023. III. Título.

VICTOR HUGO ANDREIS SEBEN

**IMPLEMENTAÇÃO DE PLANTA DE PIRÓLISE DE BAIXO CUSTO EM ESCALA
LABORATORIAL PARA PROCESSAMENTO DE BIOMASSA RESIDUAL E
DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PRODUTOS**

Monografia apresentada como requisito parcial de obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientadora: Prof.^a Dra. Lúcia Allebrandt da Silva Ries

Coorientador: Prof. Dr. Fabiano Perin Gasparin

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof.^a Dra. Lúcia Allebrandt da Silva Ries
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS

Coorientador: Prof. Dr. Fabiano Perin Gasparin
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Prof. Dr. Renato Letizia Garcia
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS

Prof. Me. Emerson Fernandes Cunha
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo suporte em minha caminhada até aqui, sem eles não seria possível atingir meus objetivos.

Aos meus queridos amigos pelos momentos divididos e compreensão durante esta etapa.

Aos meus orientadores, Prof.^a Dra. Lúcia Allebrandt da Silva Ries e Prof. Dr. Fabiano Perin Gasparin, por toda a batalha superada para implementação deste trabalho.

À minha colega e parceira de projeto Joyce Helena da Silveira pelo companheirismo durante toda a implementação deste trabalho.

À Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS) pela bolsa de pesquisa fornecida e conhecimento transmitido por meio de seus docentes durante o curso de graduação.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFGRS) pela colaboração no desenvolvimento deste projeto.

Ao técnico Dirceu Adair Bueno Júnior, do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFGRS), e ao profissional Domingos Vilarim Pereira Lopes, pelo apoio no projeto.

E, por fim, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para este trabalho e meu desenvolvimento.

*“Mas iremos achar o tom
Um acorde com lindo som
E fazer com que fique bom
Outra vez o nosso cantar
E a gente vai ser feliz
Olha nós outra vez no ar
O show tem que continuar.”*

Arlindo Cruz, Sombrinha e Luiz Carlos da Vila (1988)

RESUMO

Com o aumento da tecnologia no ramo agroindustrial e o conseqüente impacto nos solos e geração de resíduos, a biomassa, matéria-prima de baixo custo que armazena principalmente carbono, hidrogênio e oxigênio, vem recebendo cada vez mais a atenção acerca do seu potencial para geração de novos produtos. Nesse sentido, é necessário aprofundar os estudos em rotas tecnológicas e equipamentos que possam converter essa matéria-prima em novos materiais. O processo de pirólise é uma das rotas termoquímicas com grande potencial para o reaproveitamento de resíduos para geração de novos produtos com alto valor agregador. O objetivo deste trabalho foi desenvolver e construir uma planta de pirólise em escala laboratorial de baixo custo para processamento de diferentes biomassas. Para tanto, foram estabelecidas etapas metodológicas visando a avaliação da melhor configuração da planta e materiais ideais para implementação do processo, por meio de revisão de literatura. Foram esquematizados o reator de pirólise e o forno mufla para aquecimento e posteriormente iniciou-se a construção manual e operação da planta. Concluiu-se que, a partir da produção e caracterização dos produtos de interesse do processo, biochar e bio-óleo, que a unidade laboratorial construída é eficiente e resultou em produtos de qualidade. Testes de adsorção com o biochar utilizado produzido a partir do resíduo florestal do *Eucalyptus saligna* e *Agave Itaporanga*, atingiram percentuais de remoção de Ácido Acetilsalicílico (AAS) e azul de metileno de 62,5% e 98,0%, respectivamente. O investimento total aproximado para construção da planta foi de R\$ 5.200, resultado 74% inferior quando comparado com o valor total que fora orçado para implementação de uma planta de pirólise em escala laboratorial para processamento de diferentes biomassas. Sugere-se um estudo mais aprofundado utilizando o bio-óleo produzido no processo para determinação de sua qualidade.

Palavras-chave: Reaproveitamento de resíduos. Pirólise. Reator de pirólise. Biochar. Bio-óleo.

ABSTRACT

With the increase in technology in the agro-industrial field and the consequent impact on soils and waste generation, biomass, a low-cost raw material that stores mainly carbon, hydrogen, and oxygen, has been receiving increasing attention about its potential for generating new products. In this sense, it is necessary to deepen the studies on technological routes and equipment that can convert this raw material into new materials. The pyrolysis is one of the thermochemical routes with great potential for the reuse of waste to generate new products with high added value. The objective of this work was to develop and build a low-cost laboratory scale pyrolysis plant to process different biomasses. For this, methodological steps were established aiming to evaluate the best plant configuration and ideal materials to implement the process, through literature review. The pyrolysis reactor and the muffle furnace for heating were schematized and then the manual construction and operation of the plant was started. It was concluded from the production and characterization of the products of interest of the process, biochar and bio-oil, that the laboratory unit built is efficient and resulted in quality products. Adsorption tests with the biochar produced from the forest residue of *Eucalyptus saligna* and *Agave Itaporanga*, reached percentages of removal of Acetylsalicylic acid (ASA) of 62.5% and 98.0%, respectively. The approximate investment for the construction of the plant was R\$ 5,200, which is 74% less when compared to the total amount budgeted for the implementation of a laboratory scale pyrolysis plant for processing different biomasses. Further study is suggested using the bio-oil produced in the process to determine its quality.

Keywords: Reuse of waste. Pyrolysis. Pyrolysis reactor. Biochar. Bio-oil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Área de árvores plantadas (milhões de hectares)	16
Figura 2 - Representação esquemática da estrutura do carvão ativado.....	17
Figura 3 - Fontes originárias de biomassa	18
Figura 4 - Representação esquemática básica da molécula de celulose	20
Figura 5 - Representação esquemática básica da hemicelulose	20
Figura 6 - Representação esquemática básica das ligninas.....	21
Figura 7 - Amostra de biochar de casca de arroz.....	26
Figura 8 - Bio-óleo produzido a partir da pirólise rápida	27
Figura 9 - Esquemática do reator de pirólise e do suporte de biomassa desenvolvido.	31
Figura 10 - Concepção inicial do forno mufla e a estrutura metálica de sustentação	33
Figura 11 - Idealização final do forno mufla	33
Figura 12 - Canaletas idealizadas no forno mufla para engate do sistema de aquecimento	35
Figura 13 - Esquema do projeto elétrico.....	36
Figura 14 - Matéria-prima separada em suas partes e a coleta do material na CMPC Celulose Brasil	37
Figura 15 - Caneca cilíndrica utilizada como primeira alternativa para a câmara do reator.....	39
Figura 16 - Reator de pirólise desenvolvido.....	40
Figura 17 - Reator sob temperatura de 800 °C.....	40
Figura 18 - Suporte da biomassa antes do processo de pirólise.....	41
Figura 19 - Testes realizados para vedação do reator	41
Figura 20 - Concepção intermediária do forno mufla avaliando a disposição dos tijolos para utilização com o reator de pirólise.....	42
Figura 21 - Estrutura construída para suporte do forno	43
Figura 22 - Tampa do forno mufla	43
Figura 23 - Forno mufla implementado.....	44
Figura 24 - Confecção da resistência elétrica	45
Figura 25 - Medição da resistência elétrica desenvolvida	45
Figura 26 - Escavação dos tijolos, a colocação da resistência elétrica e o sistema em testes	46
Figura 27 - Esquemática inicial do controle de temperatura e um dos controladores utilizados	47
Figura 28 - Medidores de temperatura instalados no reator e forno mufla.....	47
Figura 29 - Controle de temperatura implementado em sua configuração final no forno mufla	48
Figura 30 - Óleo de pirólise condensando antes de entrar no condensador	48
Figura 31 - Configurações avaliadas para superar a dificuldade de condensação antecipada do óleo pirolítico... ..	49
Figura 32 - Esquemática final da unidade a produção de bio-óleo durante o processo.....	50
Figura 33 - Biochar produzido a partir dos ensaios de pirólise realizados	51
Figura 34 - Bio-óleo produzido no processo de pirólise lenta	51
Figura 35 - Amostras da mistura de biochar e AAS durante o ensaio de adsorção	52
Figura 36 - Ensaio de adsorção com o biocarvão produzido a partir da pirólise do eucalipto para remoção de AAS.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais produtos combustíveis da conversão da biomassa	22
Tabela 2 - Parâmetros do processo de pirólise e rendimento obtido dos produtos de interesse	24
Tabela 3 – Versões da tecnologia de pirólise	25
Tabela 4 - Tipos de reatores utilizados, modo de operação, vantagens e desvantagens para o regime contínuo ..	28
Tabela 5 - Tipos de reatores utilizados, modo de operação, vantagens e desvantagens para o regime em batelada	29
Tabela 6 - Principais custos envolvidos no projeto	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVO	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	14
3 REVISÃO DA LITERATURA	15
3.1 RESÍDUOS FLORESTAIS	15
3.2 BIOMASSA	17
3.3 ROTAS TERMOQUÍMICAS	21
3.4 PIRÓLISE	23
3.5 REATORES DE PIRÓLISE	27
3.6 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DE INTERESSE	29
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	30
4.1 CONCEPÇÃO DO REATOR	30
4.2 CONCEPÇÃO DO FORNO MUFLA	32
4.3 SISTEMA DE AQUECIMENTO	34
4.4 CONTROLE DE TEMPERATURA	35
4.5 COLETA DA MATÉRIA PRIMA DO PROCESSO	36
4.6 ENSAIOS DE PIRÓLISE	38
4.7 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DE INTERESSE	38
5 RESULTADO E DISCUSSÃO	39
5.1 CONSTRUÇÃO DO REATOR DE PIRÓLISE	39
5.2 IMPLEMENTAÇÃO DO FORNO MUFLA	42
5.3 CONFECÇÃO DO SISTEMA AQUECIMENTO	44
5.4 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE DE TEMPERATURA	46
5.5 UNIDADE DE CONDENSAÇÃO	48
5.6 ENSAIOS DE PIRÓLISE REALIZADOS	50
5.7 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DE INTERESSE	52
5.8 INVESTIMENTO	53
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55

1 INTRODUÇÃO

A colheita florestal é uma atividade que pode gerar grandes impactos no meio ambiente (RAMOS, 2018; CARDOSO, 2021). Devido a revolução tecnológica neste setor, empresas passaram a fazer uso de maquinário pesado agravando os processos de compactação e erosão do solo, trazendo danos ambientais (SEIXAS, JUNIOR, 2001; ANDREADE et al. 2000; FREITAS et al. 2007).

A atividade é caracterizada por uma série de operações que buscam extrair madeira comercializável (VATRAZ et al., 2019), gerando grande quantidade de resíduos florestais originados do manejo florestal, na silvicultura – desramas e desbastes – e na colheita florestal – galhos, folhas, cascas, entre outros (CANTO, 2009). Estes resíduos podem ser utilizados como matéria-prima para novas rotas de produção de subprodutos. Segundo dados publicados pela Indústria Brasileira de Árvores (IBA, 2019) no ano de 2018 o setor florestal já havia produzido aproximadamente 52 milhões de toneladas de resíduos sólidos. Desse volume, cerca de 71% foi proveniente de atividades florestais e correspondem, em sua maioria, a resíduo de cascas, galhos e folhas.

A biomassa é uma matéria prima de baixo custo e rápido acesso que armazena grande quantidade de energia, carbono, oxigênio e hidrogênio. Trata-se de uma das poucas fontes que pode facilitar a produção de energia em grande escala, forma sustentável para apoiar o desenvolvimento da sociedade (EMBRAPA, 2016) e ainda ser utilizada como matéria-prima de outros processos industriais.

O processo de pirólise é uma alternativa que apresenta grande potencial para o reaproveitamento de resíduos de diversas fontes buscando agregar valor a novos produtos e ainda contribuir para o manejo florestal adequado. A pirólise é um método que consiste na decomposição térmica, em ausência de oxigênio, de carboidratos da biomassa em resíduos carbonáceos (biochar), vapores condensáveis (bio-óleo), formado por diversos compostos orgânicos e gases não condensáveis (LEE et al., 2013).

Esta tecnologia apresenta grande potencial para geração de novos produtos de alto valor agregado. Contudo, o processo de pirólise necessita de um equipamento específico para a transformação da biomassa, o reator de pirólise. Os reatores de pirólise podem ser caracterizados a partir do movimento dos sólidos, do caráter da operação, forma de fornecimento de energia, além do tamanho de partícula empregado (PAIVA FILHO, 2020). De acordo com Caldas (2019) um dos principais desafios para o uso em larga escala do processo

de pirólise é a dificuldade em superar os obstáculos relacionados ao projeto dos reatores de pirólise, além da falta de recursos financeiros para a implementação desta tecnologia.

Nesse sentido, o estudo por alternativas que substituam de forma econômica, funcional e com bons resultados, os reatores de pirólise já existentes é fundamental para o aprimoramento e maior empregabilidade do processo de pirólise, buscando o reaproveitamento de resíduos para a produção de novos produtos com valor de mercado visando alcançar os importantes conceitos de economia circular e sustentabilidade.

Em escala laboratorial são desenvolvidas pesquisas sobre o processamento de diferentes biomassas para obtenção de novos produtos de forma a agregar valor à materiais que antes seriam considerados como resíduos de outros processos. O desenvolvimento de uma planta laboratorial de pirólise é um passo fundamental para análise e caracterização do biochar e bio-óleo, produtos de interesse desta rota termoquímica, que podem ser produzidos a partir de diversas matérias-primas, dentre elas resíduos agroindustriais.

A necessidade de pesquisa sobre reatores de pirólise, ferramentas indispensáveis para realizar este processo, é fundamental para alcançar alternativas viáveis para maior aplicação deste processo e contribuir com o manejo de diversos resíduos e com a produção de novos produtos de alto valor agregado que podem auxiliar em muitos problemas existentes atualmente.

2 OBJETIVO

Abaixo, estão descritos os objetivos que nortearam este trabalho.

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho foi projetar e construir uma planta de pirólise laboratorial de baixo custo para produção de biochar a partir de diferentes tipos de biomassa.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Os objetivos específicos do trabalho foram:

Pesquisar na literatura as melhores e mais acessíveis condições operacionais de uma planta de pirólise;

Esquematizar e projetar, em software, o reator e a planta de pirólise;

Construir, de forma artesanal, o sistema de pirólise;

Colocar a planta desenvolvida em operação;

Realizar ensaios de pirólise para avaliar a eficiência da planta desenvolvida.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, será apresentado, de forma concisa, uma revisão de literatura abordando as rotas de processamento termoquímico da biomassa lignocelulósica, com ênfase no processo de pirólise, os tipos de reatores deste processo, os principais produtos de interesse desta tecnologia e alguns métodos de caracterização.

3.1 RESÍDUOS FLORESTAIS

Os resíduos florestais são todo e qualquer material proveniente da colheita ou processamento da madeira que permanece sem utilização ao longo do processo, devido a alguma limitação tecnológica, operacional ou de mercado, sendo estes geralmente descartados ao longo da atividade de produção (NOLASCO, 2000).

De acordo com Silva et al. (2018), a madeira segue como o produto de maior comercialização da floresta e dentre os produtos, o carvão vegetal possui uma posição de destaque na geração de energia. Segundo informações divulgadas pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) (2021), a madeira é apontada como a mais importante fonte de energia renovável, respondendo por cerca de 6% da oferta global de energia primária.

A produção de resíduos florestais, em atividades madeireiras, diferencia-se de acordo com a espécie e a exploração utilizada. Em florestas submetidas ao manejo florestal, durante o desenvolvimento das atividades pré-exploratórias, uma quantidade expressiva de biomassa é deixada na floresta (CORDEIRO, 2018).

A colheita florestal é formada por diversas operações que buscam extrair da floresta a madeira comercializável. Durante esse processo, muitas perdas ocorrem e, durante a colheita, além dos resíduos, cerca de 8 a 10% são avaliadas como perdas de madeira comercial durante as etapas de corte, extração e transporte, o que representa uma parte significativa do montante extraído de uma floresta (JACOVINE, 2001). Ainda, mesmo considerando os importantes avanços tecnológicos nesses processos, o desperdício de matéria-prima ainda é muito grande (VALÉRIO *et al.*, 2007).

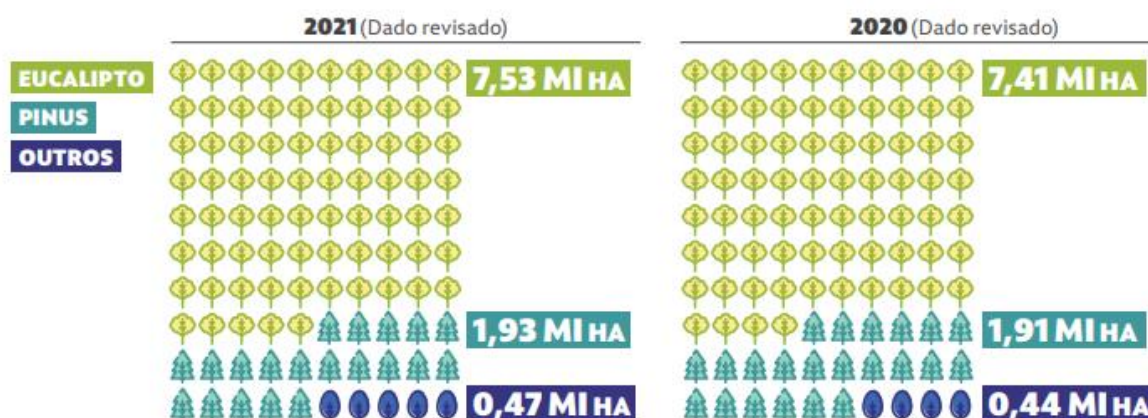
Os cultivos dedicados à biomassa podem promover significativos ganhos com a geração de energia renovável, principalmente em regiões de origem tropical e subtropical, graças à grande disponibilidade de energia solar, bem como de terras agricultáveis e recursos hídricos, condições estas encontradas no Brasil. Entre esses cultivos destacam-se as florestas energéticas,

compostas por espécies de rápido crescimento, como o eucalipto, e as gramíneas forrageiras, como cana-energia, sorgo biomassa e capim elefante, que possuem elevada eficiência fotossintética na fixação do carbono atmosférico (MARAFON *et al.*, 2016).

A cadeia energética da biomassa compreende o cultivo, a colheita, a coleta, o transporte e a transformação da biomassa, através de um ou mais processos consecutivos, desde o recurso primário até a eletricidade disponível na rede. Fazem parte desse grupo as gramíneas energéticas como o capim-elefante, a cana-energia e o sorgo-biomassa e a silvicultura com destaque para as florestas plantadas como eucalipto e pinus (TOLMASQUIM, 2016)

A figura 1 apresenta os dados revisados do plantio de árvores para anos 2020 e 2021.

Figura 1 - Área de árvores plantadas (milhões de hectares)



Fonte: Indústria Brasileira de Árvores – IBA (2022)

3.1.1 Carvão Ativado

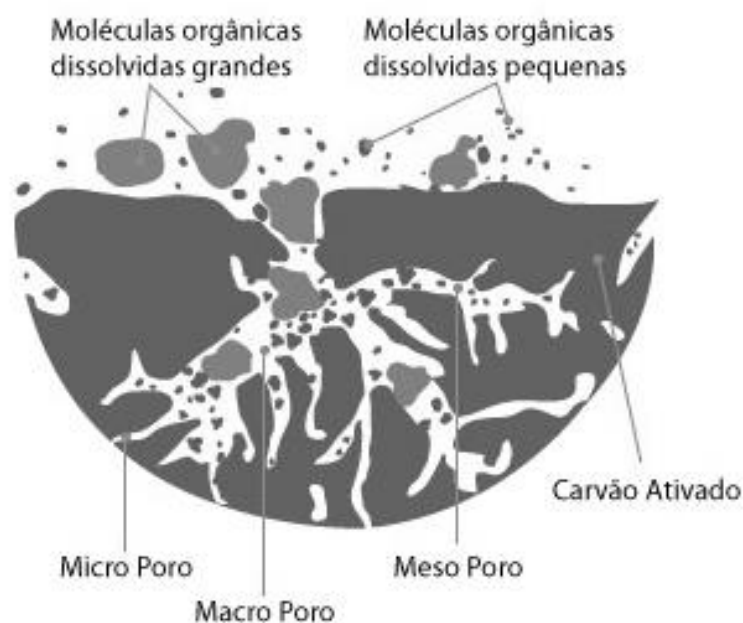
O carvão ativado é um material carbonáceo com porosidade desenvolvida que apresenta grande eficácia para purificação, clarificação e desodorização. A utilização mais usual do carvão ativado é para a elaboração de filtros para adsorção de gases e no tratamento de águas (FREITAS *et al.* 2020).

O custo envolvido na preparação do carvão ativado o torna, muitas vezes, inviável para utilização em escala industrial (CONSTANTIN *et al.* 2021). A produção do carvão ativado é resultado de duas etapas básicas: a carbonização, através da pirólise da matéria prima, e a ativação propriamente dita (CLAUDINO *et al.* 2003). De acordo com Oliveira *et al.*, (2014), o

carvão ativado pode ser obtido, na maioria das vezes, a partir de matérias como madeira, casca de arroz, coco, nozes, entre outras matérias-primas.

A figura 2 apresenta a representação esquemática da estrutura do carvão ativado.

Figura 2 - Representação esquemática da estrutura do carvão ativado



Fonte: MACROVENDA, (2016)

Diante do contexto apresentado, a grande dificuldade de utilização e ampliação da empregabilidade do carvão ativado está associado ao alto custo envolvido na produção deste material.

3.2 BIOMASSA

A potencialidade de qualquer combustível depende de suas características termoquímicas, como a composição elementar, granulometria, densidades, grau de umidade, entre outros, as quais definem o poder calorífico da biomassa (EMBRAPA, 2016).

A biomassa, de acordo com Caldas (2019), nada mais é que um tipo de massa de organismos que já possuíram vida, ou seja, organismos biológicos. Brigdwater *et al.* (1999) caracterizaram a biomassa como uma fonte de energia renovável com grande potencial para contribuir com as demandas energéticas da sociedade moderna.

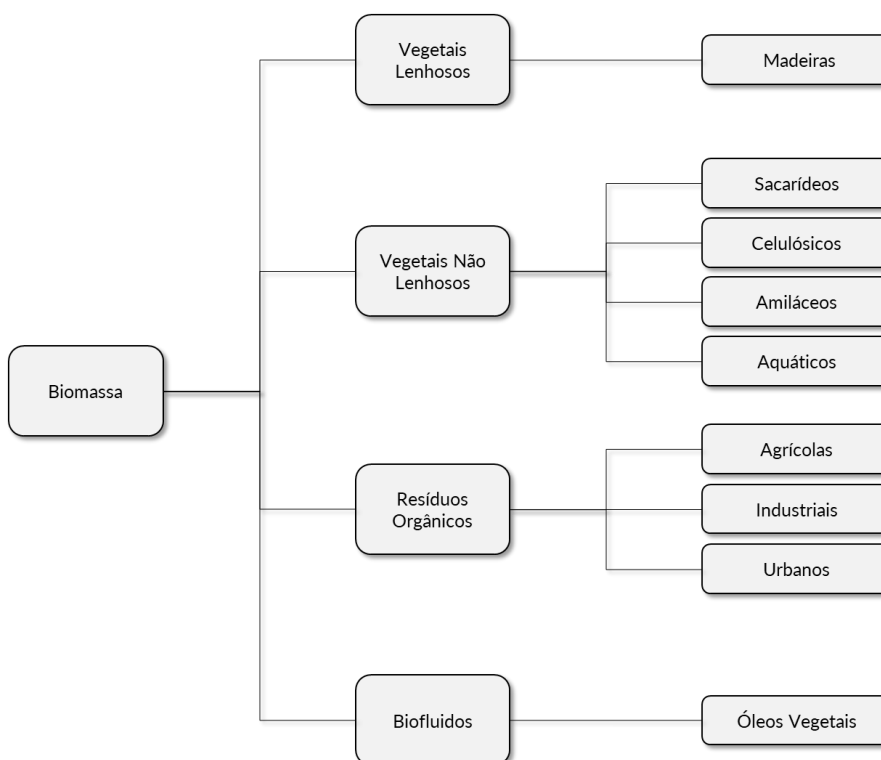
Analisando no âmbito da energia, a biomassa é todo recurso renovável proveniente de matéria-orgânica, animal ou vegetal, como óleos e plantas. A biomassa pode também ser gerada a partir de resíduos industriais como papel, madeira, grãos, alimentos e bebidas, como também de resíduos urbanos como lodo de esgoto e aterros sanitários (MIRANDA, 2009).

Segundo Ferreira (2014) a biomassa pode ser apresentada como a quarta fonte de energia mais usada no mundo e que apresenta alta capacidade de produção de energia. Contudo, um grande desafio do uso da biomassa como matéria-prima para geração de energia é sua baixa densidade, o que torna sua utilização onerosa e dificulta seu transporte (RENNARD *et al.*, 2010).

A obtenção da biomassa pode ser proveniente de vegetais lenhosos, como a madeira e seus resíduos, vegetais não-lenhosos e de resíduos orgânicos, em que são encontrados os resíduos urbanos industriais e agrícolas (CORTEZ, *et al.*, 2008).

A figura 3 apresenta as possíveis fontes originárias de biomassa

Figura 3 - Fontes originárias de biomassa



Fonte: Adaptado de Ministério de Minas e Energia, (1982) *apud* LOPEZ, (2008)

A biomassa é composta por células que variam de acordo com a estrutura da espécie utilizada. As biomassas possuem paredes celulares formadas por microfibrilas de celulose, envoltas por uma matriz de hemicelulose e lignina, que se faz presente em alguns hidrocarbonetos e lipídios (SHAFIZADEH, 1982 *apud* MARIN MESA, 2011).

3.2.1 Biomassa Lignocelulósica

De acordo com Dhyani (2018), a biomassa lignocelulósica se refere à matéria proveniente de plantas ou base de plantas que não competem com a produção de alimentos, além de ser uma fonte abundante, de baixo custo e com emissões de dióxido de carbono praticamente nulas, pois ele é reabsorvido no próximo ciclo de vida da planta pelo processo da fotossíntese.

Este material constitui 14% da energia primária do planeta ficando atrás apenas do carvão, petróleo e gás natural (PIMENTA, 2022) e consiste em um composto de fibra celulósica em que macromoléculas se mantêm agregadas por uma matriz de polissacarídeos (celulose e hemicelulose) e lignina, que são os componentes majoritários da fibra, além de outras substâncias de baixo peso molecular como minerais inorgânicos e extrativos orgânicos (FENGEL, *et al.*, 1989 *apud* SANTOS, 2012).

A composição química da biomassa lignocelulósica é geralmente distribuída em 35 a 50% de celulose, seguido por 20 a 35% de hemicelulose e, por fim, 10 a 25% de lignina, associada a uma pequena parcela de cinzas e extrativos (SANTOS, 2012).

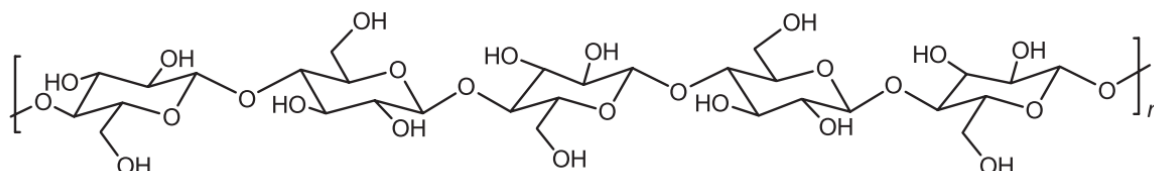
Celulose

A celulose é um polímero orgânico mais presente e um dos principais componentes da parede celular dos vegetais e é formado por unidades de glicose ligadas por átomos de hidrogênio com alto grau de polimerização e grande força de ligação (ALMEIDA, 2010). As ligações de hidrogênio presentes neste polímero são responsáveis pela rigidez do polímero e as ligações intramoleculares, entre as estruturas de glicose apresentam o papel de formação das fibrilas, que são estruturas ordenadas que se associam formando as fibras de celulose (VÁSQUEZ, 2007).

O arranjo molecular da celulose é ordenado e uniforme na região cristalina e desordenado na região amorfa, contudo, não há divisão nítida entre essas duas regiões (CHIEN *et al.*, 2011).

De acordo com Vamvuka *et al.*, (2003) a temperatura mínima de decomposição dos polímeros de celulose é superior a 300 °C. Assim, a degradação da maior parte da celulose ocorre em torno de 240 a 390 °C. A figura 4 apresenta a representação esquemática básica da molécula de celulose.

Figura 4 - Representação esquemática básica da molécula de celulose



Fonte: SANTOS *et al.*, (2012)

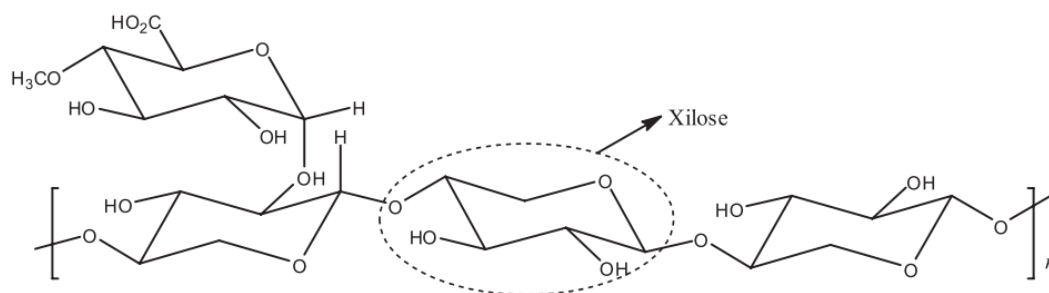
Hemicelulose

As hemiceluloses são polissacarídeos da parede celular vegetal e são os segundos polímeros renováveis mais abundantes, atrás apenas da celulose. A hemicelulose representa um tipo de heteropolissacarídeo com complexa estrutura que contém glicose, xilose, manose, lactose, entre outros componentes (PENG, *et al.*, 2012).

Conforme apresentado por Vamvuka *et al.* (2003) a decomposição da hemicelulose geralmente ocorre na faixa entre 160 e 360 °C e resulta em produtos semelhantes àqueles alcançados na degradação térmica da celulose a partir do processo de pirólise.

Na maioria das vezes, as hemiceluloses são classificadas de acordo com o resíduo de açúcar principal, como exemplo as glucanas, mananas e xilanas (WYMAN, *et al.*, 2005). A figura 5 apresenta a representação esquemática básica da hemicelulose.

Figura 5 – Representação esquemática básica da hemicelulose



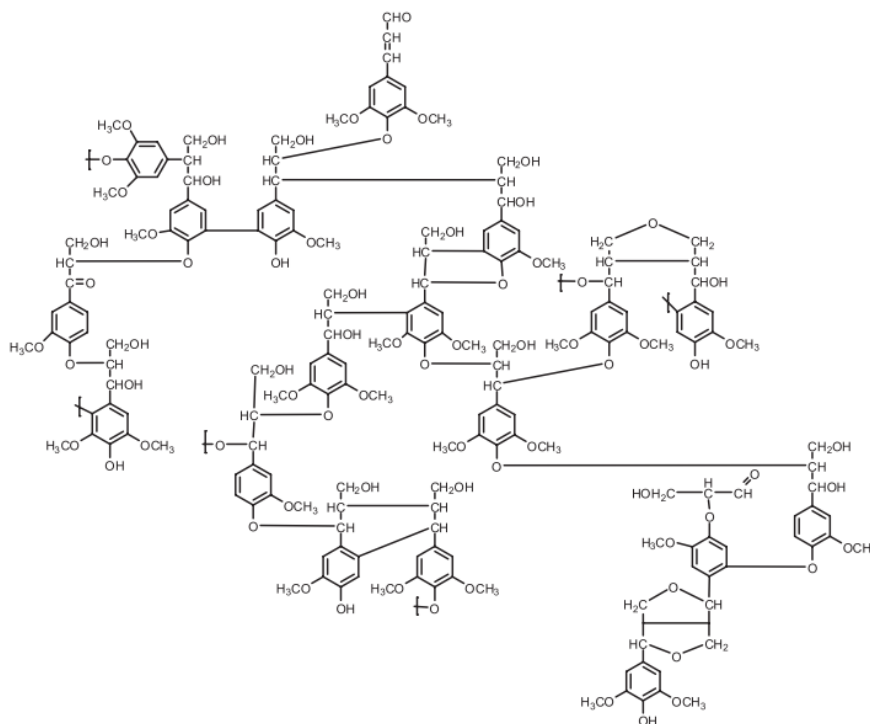
Fonte: SANTOS *et al.*, (2012)

Lignina

A lignina é uma substância hidrofóbica que apresenta estrutura tridimensional e amorfa, com alto grau de ramificações (SILVA, 2011 *apud* OGATA, 2013). Esta macromolécula corresponde ao terceiro componente principal da parede celular vegetal e compõe cerca de 20 a 30% desta estrutura (NASCIMENTO, 2007).

De acordo com Pimenta (2022), se comparada com a celulose e hemicelulose, a lignina possui uma matriz aromática que resulta em força e rigidez na parede celular vegetal. As ligações das unidades básicas são complexas e divididas em três classes: ligações de éter, carbono-carbono e ligações de ésteres. A lignina se degrada gradualmente na faixa de temperatura entre 200 e 850 °C (VAMVUKA *et al.*, 2003). A figura 6 apresenta a representação esquemática da lignina de eucalipto.

Figura 6 - Representação esquemática básica das ligninas



Fonte: SANTOS *et al.*, (2012)

3.3 ROTAS TERMOQUÍMICAS

A biomassa pode ser utilizada para produção de combustíveis, energia ou gases desejáveis a partir de diferentes processos. A conversão termoquímica da biomassa faz uso de

calor e, em alguns casos, de catalisadores para produção de combustíveis e insumos químicos. O processamento bioquímico da biomassa emprega enzimas e microrganismos para esta conversão (BROWN & WANG, 2017).

Os principais produtos combustíveis da conversão da biomassa, de acordo com Basu (2013), são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Principais produtos combustíveis da conversão da biomassa

Combustíveis Sólidos	Combustíveis Líquidos	Combustíveis Gasosos
Biomassa torrificada	Metanol	Biogás (CH ₄ +CO ₂)
Biocoque	Etanol	Gás de síntese (CO+H ₂)
Biochar	Biodiesel	
	Óleo vegetal	
	Bio-óleo	

Fonte: Adaptado de BASU (2013)

Tendo em vista algumas dificuldades para transformação da biomassa em energia, já citadas neste trabalho, são avaliadas alternativas para conversão da biomassa ao longo dos anos. Conforme apresentado por Guedes et al. (2010) as principais rotas de conversão da biomassa são a combustão, liquidação, fermentação, biodigestão, gaseificação e pirólise.

A combustão é o método mais barato e simples de converter biomassa em energia. Qualquer material orgânico que possua baixa umidade suficiente para possibilitar a combustão sustentada pode ser usado como matéria prima. O calor gerado no processo pode ser utilizado para geração de eletricidade através de turbinas a vapor ou para o aquecimento de utilidades (SPEIGHT, 2020).

Segundo Biller et al. (2012), o processo de liquefação ocorre geralmente entre 250 e 374 °C sob pressão de 4 a 22 MPa par produção de petróleo bruto ou bio-óleo. De maneira distinta do processo de pirólise, a liquefação não necessita de pré-secagem da biomassa para uso como matéria prima.

Fermentação é o processo que faz uso de enzimas e microrganismos para transformação do açúcar, presente na biomassa, em outros produtos como ácidos e álcoois. Os componentes mais produzidos são o metanol, etanol, hidrogênio e ácido acético (YAASHIKAA et al., 2020).

A biodigestão corresponde ao processo de produção do biogás. Esta rota necessita de um reator específico onde, sob condições controladas, ocorrem processos biológicos para

produção deste gás. É fundamental o correto manejo dos parâmetros do processo como Ph, temperatura, alcalinidade, entre outros (EMBRAPA).

Cherubini (2010) apresenta que o processamento da biomassa por gaseificação corresponde à conversão da biomassa em gás de síntese, através do contato com um meio reacional, podendo ser ar, oxigênio puro ou ainda vapor d'água em condições subcríticas. O produto desse processo pode ser usado diretamente como combustível, ou utilizado como matéria prima para produção de insumo químicos como hidrocarbonetos sintéticos, álcoois e ácidos

A tecnologia da pirólise consiste no processo baseado na decomposição dos componentes da biomassa por meio de uma fonte de calor. Dentre os produtos gerados, destacam-se uma mistura de gases ricos em hidrocarbonetos, um líquido composto por vários componentes orgânicos e um resíduo sólido rico em carbono com nome de biocarvão (PIMENTA, 2022). O processo de pirólise será mais detalhado na seção seguinte.

3.4 PIRÓLISE

A pirólise é um processo proposto para o tratamento e agregação de valor aos resíduos agrícolas. Se trata da degradação térmica da biomassa em atmosfera livre de oxigênio, onde a biomassa é desvolatilizada e transformada em carvão (biochar), produtos líquidos (bio-óleo) e gases. A geração de líquido (bio-óleo) é o que diferencia a pirólise das tecnologias de carbonização e gaseificação, o qual é um produto economicamente interessante visto o potencial de ser armazenado e aplicado como precursor de combustíveis ou como fonte de químicos e outros produtos de maior valor agregado (RAYMUNDO, 2022).

Segundo Pimenta (2022) cada material apresenta uma característica particular quando submetido ao processo de pirólise, tendo em vista a composição da biomassa lignocelulósica. E, nesse processo, a celulose e hemicelulose auxiliam positivamente para a produção de bio-óleo. Por outro lado, a lignina é o constituinte responsável por altos rendimentos de sólidos. A interação entre a hemicelulose e a lignina promove a produção de fenóis derivados da lignina e impede a geração de hidrocarbonetos. A lignina também interage significativamente com a celulose durante a pirólise, reduzindo assim a formação de biochar. Já a interação celulose-hemicelulose tem um efeito menor na formação e distribuição dos produtos da pirólise (WANG *et al.*, 2011).

Os parâmetros operacionais da pirólise são amplamente investigados para avaliar o efeito dos mesmos no rendimento e na qualidade dos produtos gerados. Além das características

da biomassa, como o tamanho e o teor de umidade da partícula, a temperatura de reação, a vazão de gás inerte e as rampas de aquecimento também são condições importantes para um bom rendimento de processo (PIMENTA, 2022). Uma seleção adequada das condições de operação requer grande conhecimento dos fatores que influenciam no processo, como o tempo de residência e a temperatura de operação (WEBER *et al.*, 2018) e influencia diretamente na qualidade e quantidade dos principais produtos do processo.

A tabela 2 indica os principais parâmetros de processo e o rendimento obtido dos produtos de interesse da pirólise.

Tabela 2 - Parâmetros do processo de pirólise e rendimento obtido dos produtos de interesse

Parâmetros			Rendimento dos Produtos (%)		
Temperatura (°C)	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Tempo de Residência do Vapor	Líquidos	Sólidos	Gases
~500	~100	segundos	75	12	13
<450	~10	dias	30	35	35
~900	>100	horas	5	10	85

Fonte: BRIDGWATER, (1999)

A partir da determinação dos parâmetros do processo, a pirólise pode ser classificada de acordo com essas variáveis. A tabela 3 apresenta as diferentes versões da tecnologia da pirólise.

Tabela 3 – Versões da tecnologia de pirólise

Processo de Pirólise	Tempo de Residência	Taxa de Aquecimento	Temperatura Máxima	Produto Majoritário
Carbonização	horas-dias	Muito Pequena	400 °C	Biochar
Convencional	1800s	Pequena	600 °C	Biochar, Bio-óleo e gases não condensáveis
Rápida	0,5-5s	Intermediária	650 °C	Bio-óleo
Flash Pirólise	<1s	Alta	< 650 °C	Bio-óleo e Gases não condensáveis

Fonte: Adaptado de BRIDGWATER & BRIDGE (1991)

3.4.1 PRODUTOS DA PIRÓLISE

O produto sólido resultado do processo da pirólise pode ser utilizado para a produção de carvão ativado, além de apresentar potencial para uso como combustível, fertilizante e correção do solo. Podendo ainda, melhorar a capacidade de retenção de água pelo solo. O incremento de biochar no solo auxilia para a reposição de carbono, nitrogênio e micronutrientes (magnésio, fósforo, potássio, ferro) que se esgotam após várias colheitas (IOANNIDOU *et al.*, 2009). De acordo com Pimenta (2022), normalmente, o carvão de pirólise possui poder calorífico superior (PCS) de aproximadamente 30 MJ/kg, podendo variar de acordo como com a biomassa pirolisada, de modo que, o mesmo pode ser usado também como combustível sólido.

Conforme indicado por Pimenta (2022), o biochar apresenta grande número de aplicações, desde a geração de calor e energia até o enriquecimento de solos e as propriedades dessa biomassa pirolisada dependem da matéria-prima do processo. Rodrigues (2019), complementa indicando que o biochar produzido no processo de pirólise pode ser utilizado como adsorvente na remoção de metais pesados e substâncias orgânicas tóxicas de efluentes, sendo uma alternativa para substituir o carvão ativado comercial.

De acordo com Liu *et al.*, (2015) o biochar apresenta como elementos majoritários o carbono (C), mas também contém em sua composição hidrogênio (H), oxigênio (O), cinzas e

traços de nitrogênio (N) e enxofre (S). A composição elementar do biocarvão oscila de acordo com a biomassa bruta do qual o *char* foi produzido e as características principais do processo.

A figura 7 apresenta uma amostra de biochar produzido a partir da pirólise de casca de arroz.

Figura 7 - Amostra de biochar de casca de arroz



Fonte: RAYMUNDO (2022)

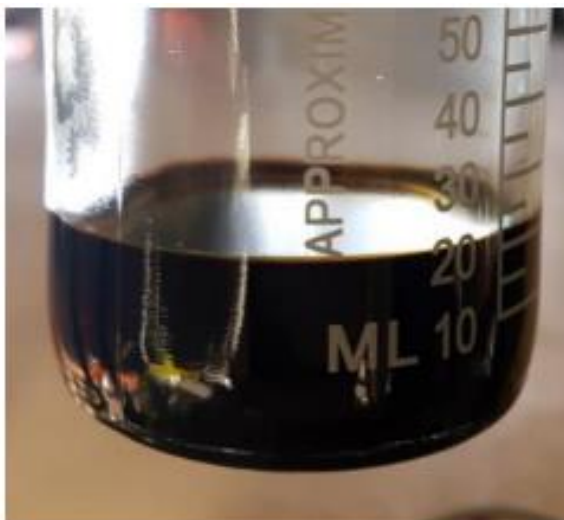
Os produtos líquidos da pirólise de biomassas caracterizam-se por compostos orgânicos condensáveis e água. Em processos de pirólise rápida e flash e temperaturas moderadas, o produto líquido tem rendimentos aproximado de até 75% em base seca, e se apresenta como uma mistura negra ou marrom de centenas de compostos orgânicos oxigenados e água, chamada de óleo de pirólise ou bio-óleo (GUEDES *et al.*, 2018).

O bio-óleo produzido a partir do processo de pirólise apresenta alto valor agregado para a indústria de combustíveis, como para a indústria de solventes e resinas. Além disso, ainda pode ser utilizado no desenvolvimento de diversas substâncias químicas de interesse da classe industrial (GUEDES, 2010; BRIDGWATER,2010).

Segundo Lu *et al.*, (2009), a composição química do óleo de pirólise varia, geralmente, conforme a biomassa, pré-tratamento da matéria-prima, tamanho e forma das partículas, teor de umidade e cinzas, além dos parâmetros do processo de pirólise como, a taxa de aquecimento,

o tempo de residência, temperatura entre outros. A figura 8 apresenta uma amostra de bio-óleo produzido a partir do processo de pirólise.

Figura 8 - Bio-óleo produzido a partir da pirólise rápida



Fonte: RAYMUNDO (2022)

O produto gasoso do processo de pirólise, o gás pirolítico, é constituído por gases como monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂), hidrogênio (H₂), metano (CH₄) e etano (C₂H₆) que são produzidos da quebra dos gases condensáveis que são formados nos primeiros estágios do processo de pirólise (MLONKA-MĘDRALA *et al.*, 2021). Após a passagem dos gases produzidos pela unidade de condensação dos voláteis, o gás resultante deste processo é constituído basicamente por vapor d'água e dióxido de carbono.

3.5 REATORES DE PIRÓLISE

O principal equipamento e maior objeto de estudos e desenvolvimento é o reator de pirólise (BRIDGWATER, 2012). Diante dos diferentes tipos de pirólise também existem diversos modelos de reatores que podem atender às condições necessárias do processo. De acordo com Paiva Filho (2020), dentre os reatores existentes, estão os reatores de leito fluidizado (circulante e borbulhante) e de leitos transportadores (parafuso duplo e cone rotativo). Existem, ainda, reatores de leito fixo, que são caracterizados por uma confecção mais simples, em que a biomassa fica disposta sem estar imersa no fluido de processo.

A possibilidade de domínio dos principais parâmetros do processo de pirólise auxilia para a definição das melhores condições para a rota termoquímica aumentando a quantidade dos produtos de interesse. Contudo, quando mais específico o reator e conseqüentemente a planta de pirólise, mais oneroso se torna o processo. Conforme apresentado por Sebben *et al.* (2022), ainda que haja grande interesse energético, industrial e ambiental no processo de pirólise, existem ainda dificuldades para emprego em grande escala. O desenvolvimento de reatores pirolíticos menos onerosos é um dos desafios que precisam ser superados. Visto a necessidade de equipamento específico, atmosfera inerte e gás de arraste e altas temperaturas de processo, o investimento em reator que atenda essas condições é elevado

A tabela 4 apresenta os tipos de reatores mais comuns, os modos de pirólise em que são capazes de operar, as vantagens e desvantagens de cada alternativa para o regime contínuo do processo.

Tabela 4 - Tipos de reatores utilizados, modo de operação, vantagens e desvantagens para o regime contínuo

Reator	Tipo de Pirólise	Vantagens	Desvantagens
Leito circulante	Flash, rápida	Mais rápido e temperatura homogênea que o leito fluidizado	Alto consumo de gás de arraste
Leito fluidizado	Flash, rápida	Alta transferência de calor e massa. Não possui partes móveis e selos mecânicos na região quente	Trabalha em estreita faixa de tamanho de partícula. Tempo de residência, grau de agitação e remoção de sólidos controlados por vazão do gás de arraste
Leito de jorro	Flash, rápida	Sem distribuidor de gás de arraste e opera em regime de agitação robusto	Construção e separação de sólidos mais complexa que o leito fluidizado
Tambor rotativo	Intermediária, lenta	Mecanicamente robusto e não necessita de gás de arraste	Menor troca de calor e possui selos e partes móveis em partes quentes
Rosca	Intermediária, lenta	Bom controle do transporte de sólidos e não necessita de gás de arraste	Menor troca de calor e há desgaste da rosca

Fonte: RAYMUNDO (2022)

A tabela 5 apresenta os tipos de reatores mais comuns, os modos de pirólise em que são capazes de operar, as vantagens e desvantagens de cada alternativa para o regime em batelada.

Tabela 5 - Tipos de reatores utilizados, modo de operação, vantagens e desvantagens para o regime em batelada

Reator	Tipo de Pirólise	Vantagens	Destantagens
Leito fixo	Intermediária, lenta	Simplicidade	Lento, não agitado, e necessidade de carga e descarga
Tambor rotativo	Intermediária, lenta	Agitação e homogeneidade	Selo em partes quentes e necessita de motores
Leito fluidizado	Intermediária	Agitação e homogeneidade	Consumo de gás de arraste e limitado tamanho de partícula

Fonte: RAYMUNDO (2022)

3.6 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DE INTERESSE

Para determinação da eficiência dos produtos de interesse do processo é possível realizar alguns ensaios de caracterização buscando avaliar o comportamento e resultados obtidos como o ensaio de adsorção com o biochar produzido e cromatografia gasosa com o bio-óleo resultante do processo. Será abordado na sequência o processo de caracterização do biochar por meio da adsorção.

O processo de adsorção é um dos métodos mais populares para remoção de substâncias contaminantes da água (NASCIMENTO *et al.*, 2020). Este método consiste em uma operação de transferência de massa na qual um sólido é concentrado na superfície de determinada substância pré-existente em soluções. Quando as moléculas de um fluido – adsorbato – entram em contato com o material sólido – adsorvente – há uma força de atração entre o sólido e as moléculas do fluido que provocam a fixação na superfície do adsorvente (GOMIDE, 1980).

A adsorção é um dos processos físicos mais efetivos para a remoção de corantes de efluentes têxteis, visto que não há a formação de intermediários e sendo este processo dependente apenas de fatores físico-químicos como a área superficial do adsorvente, tamanho de partícula, características estruturais e morfologias (PEREIRA, 2001).

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Nesta seção é apresentado o detalhamento das soluções de engenharia utilizadas no desenvolvimento do reator de pirólise, descrevendo os aspectos construtivos do reator de pirólise e do forno mufla, além dos aspectos elétricos e de controle de temperatura. Também é descrita a metodologia para a realização da pirólise e para avaliação do biochar obtido.

4.1 CONCEPÇÃO DO REATOR

O desenvolvimento do projeto do reator de pirólise foi realizado em software de projetos 3D com o intuito de confeccionar um equipamento robusto e simples, que suportasse diversas temperaturas e uma ampla gama de matérias-primas. Foram esboçados diversos modelos para o reator, buscando identificar a melhor configuração em termos de simplicidade e eficiência para o processo.

Em uma primeira tentativa de utilização de materiais disponíveis comercialmente e de baixo custo, foi avaliado o emprego de uma caneca cilíndrica de uso doméstico de aço inoxidável. No entanto, ao tentar realizar a primeira solda com o processo TIG, a reduzida espessura da parede do utensílio impediu a continuação desta etapa.

Visto que o primeiro material testado não suportou a temperatura da solda aplicada, o reator foi construído a partir de um tubo cilíndrico de aço inoxidável com espessura superior à da caneca utilizada, com 6,0 mm de espessura, 130,0 mm de altura e 55,0 mm de raio, com volume interno de aproximadamente 1.200 cm³ e capacidade de pirolisar 150 cm³ de material.

A entrada e a saída dos gases se dão através de duas tubulações de 6,0 mm de diâmetro, confeccionados com o mesmo material do reator e, soldados nas suas laterais. A estes tubos foram adaptadas mangueiras de silicone, uma responsável por trazer o gás inerte para o interior do reator e outra para conduzir os gases oriundos do processo para o sistema de condensação.

Ao reator foi acoplada uma tampa projetada para permitir a vedação do sistema, garantindo, assim, uma atmosfera inerte necessária para o processo, sendo a fixação da tampa ao reator realizada por dois parafusos.

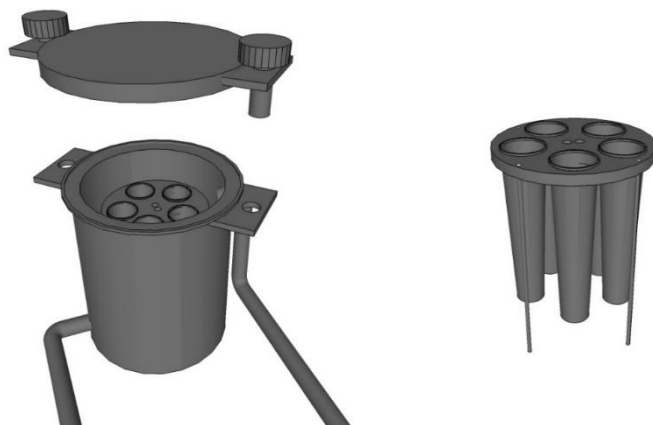
A vedação do reator constitui um ponto crítico, pois torna-se necessário o emprego de materiais refratários que ofereçam uma vedação adequada suficiente para o sistema. Dentre as possibilidades testadas, usou-se inicialmente uma gaxeta cilíndrica de fibra de vidro, que não se mostrou adequada para temperaturas acima de 500 °C. Uma segunda opção foi utilizar uma vedação metálica de cobre, porém os vazamentos foram consideravelmente elevados.

O melhor material encontrado comercialmente foi uma vedação construída de papel cerâmico ou uma gaxeta circular de fibra cerâmica. A vedação de papel cerâmico possibilitou uma vedação adequada até 800°C. Entretanto ela é relativamente frágil e tem uma vida útil pequena pois acaba se deteriorando com o manuseio, o que aumenta o custo do ensaio. Outra opção viável encontrada foi a confecção de um anel de gaxeta cilíndrica de fibra cerâmica. Ela é adquirida em seções longas, cortada e unida com uma costura baseada em fios de cobre. Esta opção se mostrou favorável, pois permitiu uma boa vedação do sistema mesmo para as temperaturas de trabalho empregadas.

O reator foi desenvolvido para operação em batelada, em leito fixo e a alimentação da biomassa é realizada de forma manual. A biomassa previamente processada é manualmente depositada em cilindros vazados que são inseridos no suporte principal. O suporte foi construído em aço inoxidável, sendo uma estrutura de aproximadamente 100,0 mm de altura e 75,0 mm diâmetro com cinco aberturas para posicionar os cilindros de contenção da biomassa. Os cilindros de contenção são infusores comerciais de aço inoxidável da marca Tramontina®. Com 80,0 mm de altura e 22,0 mm de diâmetro, cada infusor possui um volume interno de 30 cm³. Dessa forma, o volume máximo de biomassa que pode ser distribuída nos infusores é de 150 cm³.

A inserção e retirada do reator do forno mufla é feita por uma haste de sustentação que suporta altas temperaturas e, para facilitar o manuseio, foi soldado uma espera para engate da haste no corpo do reator. A figura 9 apresenta a esquematização do reator de pirólise e do suporte da biomassa desenvolvido.

Figura 9 - Esquematização do reator de pirólise e do suporte de biomassa desenvolvido.



4.2 CONCEPÇÃO DO FORNO MUFLA

O processo de pirólise necessita de temperaturas elevadas, acima de 400 °C. Para o aquecimento do reator foi projetado e construído um forno mufla. O projeto foi primeiramente concebido também no software SketchUp. O material isolante selecionado para o forno foi o tijolo isolante Insulibar 1208/9073, um material refratário constituído de uma mistura de dióxido de silício, óxido de alumínio, óxido de ferro II e dióxido de titânio, com aproximadamente 1,58 kg/unidade e dimensões de 22,9 x 11,4 x 6,3 cm, muito utilizado em fornos industriais, por suportar temperaturas de até 1.350°C.

Os tijolos foram dispostos de forma a se encaixarem um no outro e alguns foram serrados para alcançar essa distribuição necessária. Na parte superior do forno, os tijolos foram unidos por meio de três barras roscadas, visto ser necessária uma auto sustentação. A sustentação inferior da mufla é realizada por 5 perfis de alumínio com as seguintes dimensões 456,0 x 500,0 x 250,0 mm e 1,0 mm de espessura. Barras roscadas de ¼ ” foram fixadas em locais estratégicos para reforço estrutural.

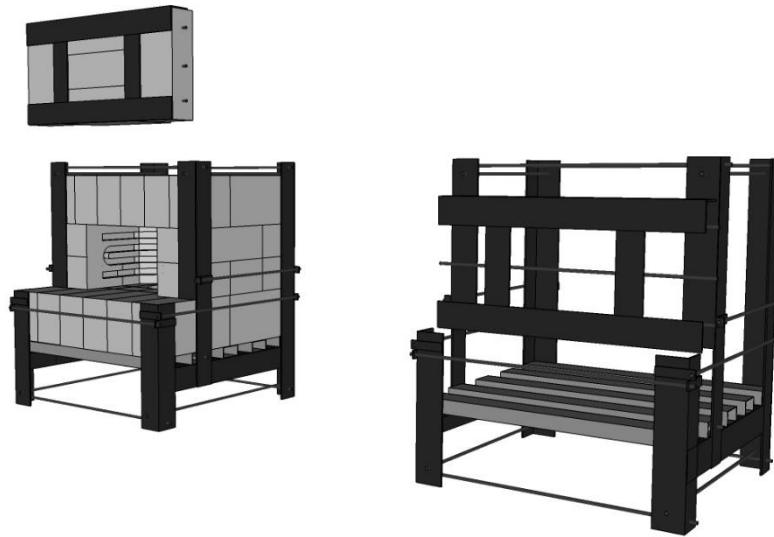
A parte metálica foi confeccionada com perfis de alumínio fixadas com parafusos, rebites e unidos por meio de barras roscadas de ¼ ”.

A tampa do forno foi construída a partir de 5 tijolos dispostos de diferentes formas, dois na vertical e três na horizontal. Os materiais foram unidos do mesmo modo descrito anteriormente para dar mais robustez à tampa. Puxadores metálicos foram instalados para auxiliar a movimentação da tampa. Duas aberturas foram feitas na parte inferior da tampa de modo que fosse possível a passagem dos dutos de gases presentes no reator e evitando significativas perdas de calor para o ambiente.

Todo o desenvolvimento e construção do forno se deu de forma artesanal em bancada do laboratório com um conjunto básico de recursos como morsa, arco de serra, limas, esmeril, furadeira e ferramentas manuais.

A Figura 10 apresenta a concepção inicial do forno mufla e a estrutura metálica responsável por sua sustentação.

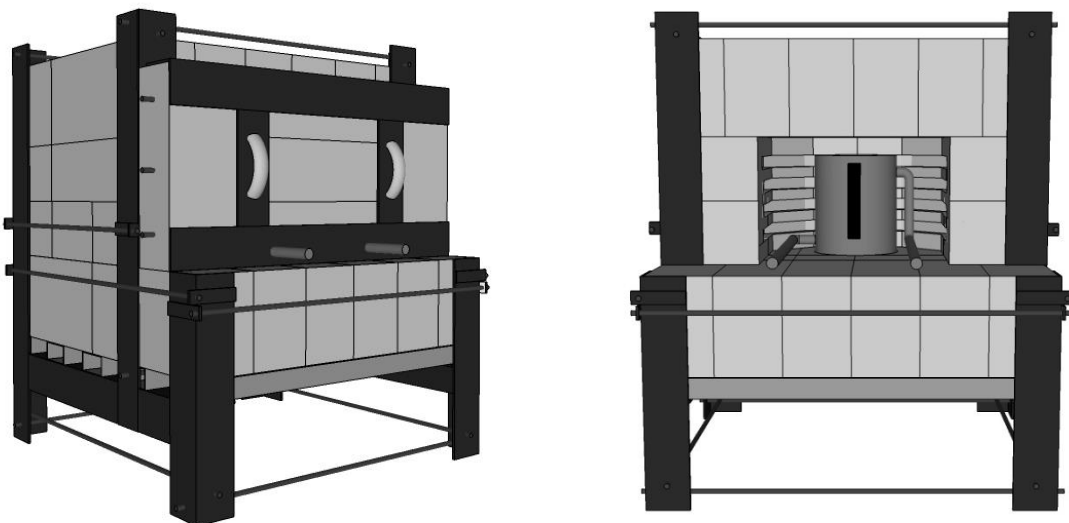
Figura 10 - Concepção inicial do forno mufla e a estrutura metálica de sustentação



Fonte: O autor

A pressão interna do forno é equilibrada pelas pequenas frestas presentes entre os tijolos, não sendo necessário realizar uma abertura significativa para alívio da pressão, tampouco utilizar uma massa refratária para união dos tijolos. Para o corpo do forno mufla foram necessários 30 tijolos refratários resultando em um equipamento de aproximadamente 47,4 kg. A Figura 11 apresenta a idealização final do forno mufla.

Figura 11 - Idealização final do forno mufla



Fonte: SEBEN *et al.*, (2022)

4.3 SISTEMA DE AQUECIMENTO

O aquecimento do forno é obtido a partir de resistência elétrica. A potência do forno foi dimensionada tendo como especificação básica a tensão de alimentação de 220 V e potência entre 3.000 e 3.300 W. Este limite foi imposto para que a corrente elétrica ficasse em torno de 15 A e, portanto, o forno mufla pudesse ser conectado de maneira segura a uma tomada de uso geral do laboratório, cuja capacidade nominal é de 20 A. Na parte superior do forno foi inserido um termopar tipo K conectado ao sistema elétrico para controlar a temperatura no interior da câmara.

Dentre os materiais adequados para a confecção do fio da resistência de aquecimento do forno mufla foi feita a opção por uma liga ferrítica de ferro-cromo-alumínio (Fe-Cr-Al) para uso em temperaturas de até 1.400 °C. O material escolhido é comercialmente conhecido como liga Kanthal® A-1, que tem como características resistividade elétrica a 20 °C de 1,45 Ω mm²/m e baixa oxidação.

O dimensionamento da resistência elétrica é um processo iterativo, isto é, um conjunto de parâmetros que deve ser ajustado simultaneamente, dentre eles, a potência elétrica, o comprimento e seção do fio resistivo, a carga térmica específica na resistência entre outros como o espaço disponível para acomodação da resistência. Dentre os diâmetros disponíveis comercialmente do fio kanthal A1, e que fosse viável para a construção manual da espiral da resistência elétrica foi especificado o Fio Kanthal A1, bitola AWG 14 (diâmetro 1,628 mm) e resistência elétrica específica de 0,696 Ω /m.

O perímetro disponível no forno mufla para acomodação da resistência em canaletas de aproximadamente 2 m é outro fator levado em conta no dimensionamento.

A resistência foi confeccionada manualmente na bancada do laboratório. Uma barra roscada de 3/8" foi utilizada como guia. A barra foi fixada na morsa por meio de duas porcas, permitindo o seu giro. Uma parafusadeira elétrica foi utilizada para girar a barra roscada enquanto o fio era enrolado na barra, sendo conduzido manualmente. Neste processo, o fio de aproximadamente 20 m resultou em uma espiral compactada. O passo final da resistência foi ajustado por deformação plástica da espiral, esticando-a até atingir o comprimento de 2 m, isto é, o perímetro do forno mufla.

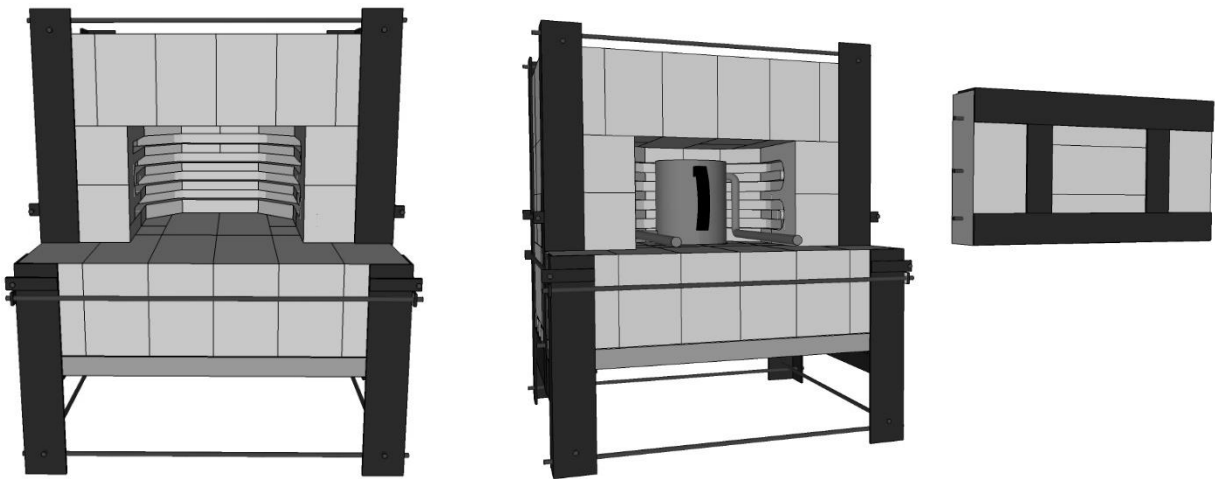
A carga específica no fio da resistência de aquecimento ficou aproximadamente 3 W/cm², estando adequado para uso em temperaturas de forno de até 1100 °C (Kanthal, n.d.) na condição de instalação da espiral em canaletas. A medição a 4 fios da resistência confeccionada

foi de $15,25 \Omega$ a 20°C e aproximadamente $15,86 \Omega$ a 1000°C , que resulta em potência de 3051 W na condição de operação.

A temperatura máxima na parte externa do forno dos tijolos é de aproximadamente 50°C , o que não acarreta um perigo aos operadores; entretanto, para manuseio do forno e do reator é necessário a utilização de luvas de proteção.

A Figura 12 apresenta as canaletas idealizadas no forno mufla para engate do sistema de aquecimento.

Figura 12 - Canaletas idealizadas no forno mufla para engate do sistema de aquecimento



Fonte: O autor

4.4 CONTROLE DE TEMPERATURA

O controle de temperatura do sistema é realizado por dois equipamentos com controle PID da marca Novus, modelos N480D-RP e N1030-PR, o que permite controlar a temperatura do forno e do reator, além de estabelecer parâmetros como rampa de aquecimento e tempo para cada patamar.

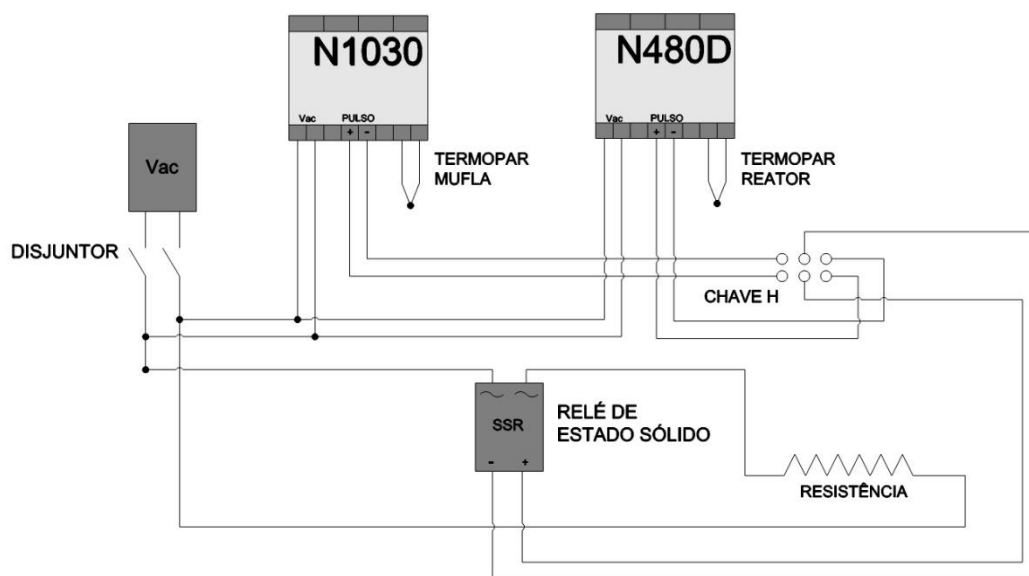
Dois termopares tipo K foram instalados na planta. Um dos termopares controla a temperatura do forno mufla e o outro termopar é inserido diretamente na câmara do reator. Os dois controladores permitem flexibilidade na operação de medida, permitindo a escolha do sensor de controle por meio de uma chave seletora. Assim, pode-se utilizar o sensor do forno para controle da temperatura em determinados ensaios.

Quando a câmara do reator é inserida no forno, o controle é feito a partir da medição da temperatura da câmara do reator.

Com o controle de temperatura do forno mufla é possível a programação de rampas e patamares e possibilitando utilizar o forno para análise imediata de biomassa, usando-o como fonte de aquecimento para determinação do conteúdo de umidade, conteúdo de cinzas, material volátil e carbono fixo.

O diagrama elétrico do sistema de controle é apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Esquema do projeto elétrico



Fonte: SEBBEN *et al.*, (2021)

4.5 COLETA DA MATÉRIA PRIMA DO PROCESSO

O material utilizado nos ensaios de pirólise foi coletado na empresa CMPC Celulose Brasil, localizada na cidade de Barra do Ribeiro, no Rio Grande do Sul. Estes ensaios são apresentados no próximo item.

A matéria-prima selecionada foi o resíduo florestal oriundo da poda do eucalipto (*Eucalyptus saligna*), com 7 anos de idade. Esta espécie é caracterizada por apresentar uma casca lisa, tronco ereto e pode alcançar até 30 m de altura. Conforme apresentado por Silveira *et al.*, (2020), o cultivo do eucalipto é um dos mais representativos no país. A espécie representa mais de 7,53 milhões de hectares plantados no ano de 2021 segundo dados da Indústria Brasileira de Árvores, correspondendo a 75,8% da área total de árvores plantadas (IBA, 2022).

O plantio do eucalipto no estado visa principalmente suprir as demandas da indústria da celulose, gerando uma grande quantidade de resíduo, constituído basicamente por cascas, galhos e folhas, que não apresenta aplicação econômica. Desta forma, devido sua ampla disponibilidade, este resíduo constitui uma excelente opção para a produção de biochar, agregando valor a este produto, através do emprego deste biochar em várias aplicações.

O biocarvão produzido a partir do resíduo do eucalipto pode ser utilizado como adsorvente de macromoléculas em processos de adsorção, tem potencial para uso como retificador de solo e ainda como combustível para geração de energia a partir da combustão.

O resíduo coletado foi levado para o laboratório da Universidade onde foi seco a temperatura ambiente, e separado em folhas, cascas e galhos. Na sequência, realizou-se a análise imediata das diferentes partes da matéria-prima, para avaliação do percentual de umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo, possibilitando assim, um melhor entendimento do potencial de cada um quando submetido ao processo de pirólise. Além disso, foram aplicadas análises termogravimétricas, elementar e de poder calorífico do material a ser pirolisado para verificação das condições necessárias para pirólise do material e produção do biochar e bio-óleo. Silveira et al., (2020) apresenta os resultados deste estudo.

A figura 14 apresenta a matéria-prima separada em suas partes e a coleta do material na CMPC Celulose Brasil realizada pelos alunos.

Figura 14 - Matéria-prima separada em suas partes e a coleta do material na CMPC Celulose Brasil



4.6 ENSAIOS DE PIRÓLISE

A partir da coleta e preparação da matéria-prima, o resíduo florestal do eucalipto foi submetido ao processo de pirólise para avaliação da eficiência da planta. Foram definidas diferentes condições de operação, variando a temperatura de processo e rampa de aquecimento. Foram fixados o tempo de residência em 1 hora e a vazão de nitrogênio utilizada em 1 L/min. A temperatura de processo variou de 400 a 800 °C e a rampa de aquecimento aplicada foi de 20 °C/min.

O produto sólido produzido (biochar) permanece no interior dos cilindros e é coletado após a finalização do processo, que se dá com o resfriamento do processo até temperatura ambiente. A coleta é feita com a retirada do suporte dos cilindros da câmara do reator e inclinando-os para escorregamento do material. Para a retirada do suporte dos infusores, foi confeccionada uma pinça fina para agarramento do equipamento. Após a coleta do material, os cilindros são lavados sob água e dispostos para secar.

O gás rico em conteúdo orgânico do processo é conduzido para o sistema de condensação onde é coletado o bio-óleo. O sistema de condensação é constituído por um condensador de bolas conectado a um banho de gelo para aumentar a eficiência desta etapa.

Os gases não condensáveis (constituídos basicamente por H₂ e CO₂) que seguem da unidade de condensação são levados por mangueiras de silicone e direcionados ao exterior do laboratório.

4.7 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DE INTERESSE

Posteriormente aos ensaios de pirólise, o biochar produzido foi submetido a caracterização por adsorção com o objetivo de avaliar a eficiência do material frente à remoção de ácido acetilsalicílico (AAS) presente em soluções sintéticas contendo 50 ppm do fármaco buscando reproduzir águas residuais com alta concentração de fármacos.

5 RESULTADO E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do desenvolvimento e construção de uma planta laboratorial de pirólise explorando as diferentes etapas do processo. Ainda, são expostos os resultados dos ensaios de pirólise e caracterização dos produtos de interesse do processo.

5.1 CONSTRUÇÃO DO REATOR DE PIRÓLISE

Após o desenvolvimento da configuração final do reator de pirólise no software, a primeira tentativa de concepção do reator foi a partir de uma caneca de aço inoxidável já existente comercialmente e que foi adquirida. Contudo, o equipamento possuía espessura muito fina e não suportou a solda TIG aplicada para fixação da entrada e saída de gases do processo.

A figura 15 apresenta a caneca cilíndrica utilizada como primeira alternativa para a câmara do reator.

Figura 15 - Caneca cilíndrica utilizada como primeira alternativa para a câmara do reator.



Fonte: O autor

Tendo em vista que a caneca cilíndrica não apresentou resultado satisfatório para utilização como reator de pirólise, foi iniciada uma segunda tentativa utilizando um tubo de aço inoxidável, o qual fora descartado de outro processo. No tubo, de espessura mais robusta, foi possível realizar a solda necessária e fixar os itens auxiliares que foram esquematizados.

O equipamento construído conseguiu suportar a temperatura do processo de pirólise, além das etapas anteriores de confecção do reator. No primeiro ensaio realizado, o reator foi aquecido à temperatura de 800 °C para validar a robustez e eficiência do equipamento.

A figura 16 apresenta o resultado do reator de pirólise desenvolvido a partir do tubo de aço inoxidável com os itens auxiliares necessários para realização do processo de pirólise.

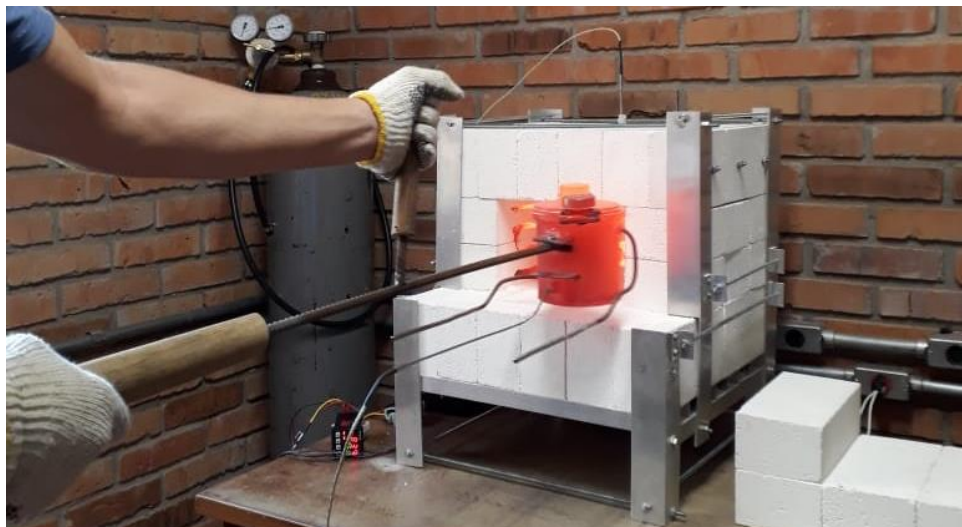
Figura 16 - Reator de pirólise desenvolvido



Fonte: O autor, SEBBEN *et al.* (2021)

A figura 17 reflete o reator aquecido para validação da eficiência e robustez do equipamento.

Figura 17 - Reator sob temperatura de 800 °C



Fonte: O autor

O suporte da biomassa para realização do processo também foi desenvolvido com peças resultantes de outros processos anteriormente e apresentou também boa eficiência durante a pirólise. Sobre o suporte ficam dispostos verticalmente cinco infusores. A figura 18 demonstra o suporte da biomassa antes do processo termoquímico.

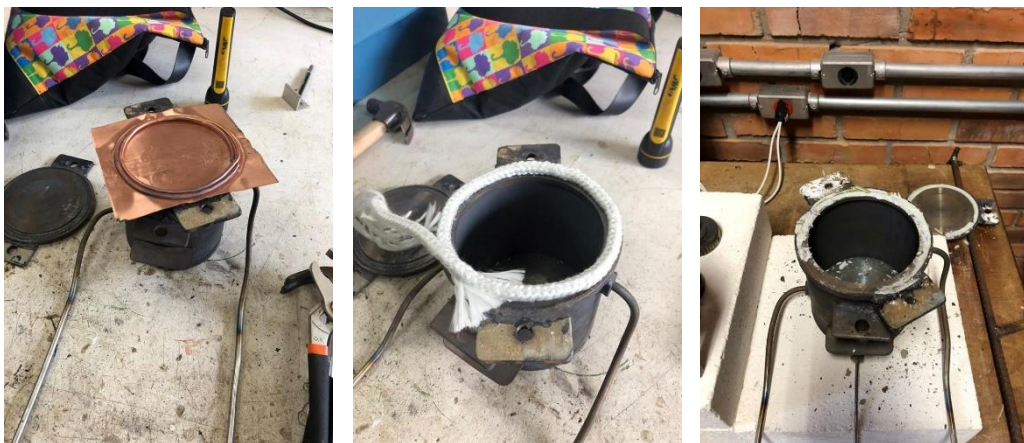
Figura 18 - Suporte da biomassa antes do processo de pirólise.



Fonte: O autor

Um dos desafios do processo foi a identificação de um material que realizasse a vedação do reator de pirólise buscando a manutenção da atmosfera inerte e temperatura do processo. A figura 19, abaixo, apresenta os testes realizados para vedação do reator.

Figura 19 - Testes realizados para vedação do reator



Fonte: O autor

5.2 IMPLEMENTAÇÃO DO FORNO MUFLA

O forno mufla implementado apresentou bons resultados frente ao processo de pirólise, em altas temperaturas, e também foi possível aplicá-lo em processos de análise térmica. A versatilidade do forno permite o controle simplificado da temperatura da câmara possibilitando mais de um uso específico para o equipamento.

A disposição dos tijolos foi realizada buscando o melhor encaixe entre os materiais que evitasse a necessidade de processos adicionais nos refratários e que possibilitasse a entrada e saída do reator sem dificuldades. A figura 20 apresenta uma etapa intermediária da construção do forno mufla avaliando a disposição dos tijolos para utilização junto ao reator de pirólise.

Figura 20 - Concepção intermediária do forno mufla avaliando a disposição dos tijolos para utilização com o reator de pirólise



Fonte: O autor

A principal desvantagem do forno mufla implementado é o seu peso, visto que o equipamento como um todo pesa cerca de 50 kg, dificultando a movimentação do forno. A estrutura de alumínio utilizada auxilia para amenização do peso total do equipamento e contribui para o bom resultado alcançado. A figura 21 apresenta a estrutura construída para suporte do forno.

Figura 21 - Estrutura construída para suporte do forno



Fonte: O autor

A tampa do forno realiza a vedação do sistema impedindo a transferência de calor para fora do equipamento. O exterior dos tijolos refratários atinge temperaturas que se aproximam a 40 °C, permitindo que com o uso de luvas de algodão seja possível operar o equipamento. A figura 22 ilustra a tampa do forno mufla.

Figura 22 - Tampa do forno mufla



Fonte: O autor

A figura 23 apresenta o forno mufla implementado.

Figura 23 - Forno mufla implementado



Fonte: O autor, SEBBEN *et al.* (2021)

5.3 CONFEÇÃO DO SISTEMA AQUECIMENTO

O sistema de aquecimento implementado foi uma das etapas mais desafiadoras do processo, tendo em vista a necessidade de concatenar a resistência elétrica em um pequeno espaço físico e buscar o bom funcionamento do equipamento. Durante a confecção da resistência elétrica, foi definido o tamanho necessário da liga para atingir a potência requerida para realização do processo.

Para alocação da resistência no corpo do forno mufla, foi escavado uma canaleta nos tijolos para colocação da resistência de aquecimento.

O sistema desenvolvido conseguiu realizar as rampas de aquecimento almejadas, manter a temperatura do processo constante durante a pirólise e aquecer o reator para realização do processo termoquímico.

A figura 24 apresenta o processo de confecção da resistência elétrica.

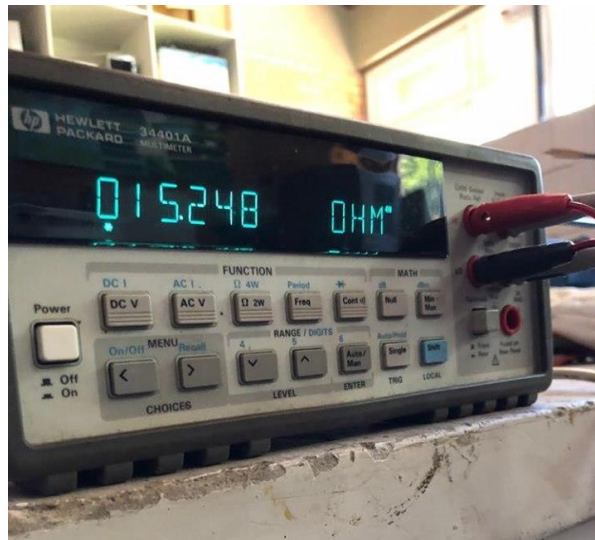
Figura 24 - Confecção da resistência elétrica



Fonte: O autor

A figura 25 indica a aferição da resistência desenvolvida.

Figura 25 - Medição da resistência elétrica desenvolvida



Fonte: O autor

A figura 26 ilustra a escavação da canaleta para inserção da resistência nos tijolos, a colocação da resistência elétrica e o sistema em testes.

Figura 26 - Escavação dos tijolos, a colocação da resistência elétrica e o sistema em testes



Fonte: O autor

5.4 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE DE TEMPERATURA

O controle de temperatura da planta é constituído por dois termopares tipo K instalados no reator de pirólise e no forno mufla e conectados a dois controladores de temperatura. Nesta configuração, é possível definir as rampas de aquecimento no forno mufla e a temperatura do processo de pirólise. Além disso, o termopar conectado no reator permite aferir a temperatura dentro da câmara e, conseqüentemente, do processo de pirólise.

Os controladores de temperatura foram instalados na parte inferior do forno mufla, em local de fácil acesso e visualização.

A figura 27 demonstra a esquematização inicial utilizada para teste do controle de temperatura e um dos controladores utilizados. A esquematização do controle de temperatura apresentou bons resultados durante os processos de pirólise permitindo o manejo deste parâmetro fundamental para o processo.

Figura 27 - Esquemática inicial do controle de temperatura e um dos controladores utilizados



Fonte: O autor

A figura 28 apresenta os medidores de temperatura instalados no reator e forno mufla.

Figura 28 - Medidores de temperatura instalados no reator e forno mufla



Fonte: O autor

A figura 29 apresenta o forno mufla finalizado, com os controladores de temperatura do forno e reator e o resultado final alcançado.

Figura 29 - Controle de temperatura implementado em sua configuração final no forno mufla



Fonte: O autor, SEBBEN *et al.* (2022)

5.5 UNIDADE DE CONDENSAÇÃO

A unidade de condensação da planta de pirólise foi desenvolvida fazendo uso de um condensador de bolas e um banho termostático. Esta foi uma etapa que trouxe também dificuldades de implementação, visto que o bio-óleo produzido no processo estava condensando ao sair do reator de pirólise e depositando-se na mangueira que o conduzia até o condensador. A figura 30 apresenta o óleo de pirólise condensando antes de entrar no equipamento de condensação.

Figura 30 - Óleo de pirólise condensando antes de entrar no condensador



Fonte: O autor

Como alternativa, foram testadas diversas configurações buscando evitar a condensação do bio-óleo antes da entrada na unidade de condensação. A figura 31 a seguir demonstra as configurações avaliadas para superar a dificuldade de condensação antecipada do óleo pirolítico.

Figura 31 - Configurações avaliadas para superar a dificuldade de condensação antecipada do óleo pirolítico



Fonte: O autor

A figura 32 apresenta a esquematização final da unidade a produção de bio-óleo durante o processo. Foi colocada uma camada de isolante térmico na saída do tubo de aço inoxidável que deixa o reator para manutenção da temperatura de processo por mais tempo. Nesta configuração foi possível condensar o produto líquido do processo.

Figura 32 - Esquemática final da unidade a produção de bio-óleo durante o processo



Fonte: O autor

5.6 ENSAIOS DE PIRÓLISE REALIZADOS

Os ensaios de pirólise foram realizados para avaliar a eficiência da planta de pirólise construída buscando principalmente a produção de biochar sob a rota da pirólise lenta. Diversas bateladas foram realizadas e a produção do biocarvão foi alcançada. O material carbonáceo é depositado no suporte da biomassa e retirado após cada batelada.

Os ensaios realizados com as diferentes partes do resíduo do *Eucalyptus saligna* apresentaram os seguintes rendimentos gravimétricos para a fase sólida: 34,29% para o resíduo, 38,96% para a casca, 33,86% para as folhas e 30,06% para os galhos. A análise termogravimétrica da biomassa residual e suas partes resultou os valores apresentados a seguir: 35,54%, 26,07%, 41,43% e 36,08% para o resíduo, cascas, folhas e galhos, respectivamente.

O reator suportou as altas temperaturas do processo e o forno mufla conseguiu também alcançar a temperatura desejada do processo, além de possibilitar as rampas de aquecimento necessárias.

A figura 33 apresenta o biochar produzido a partir dos ensaios de pirólise realizados.

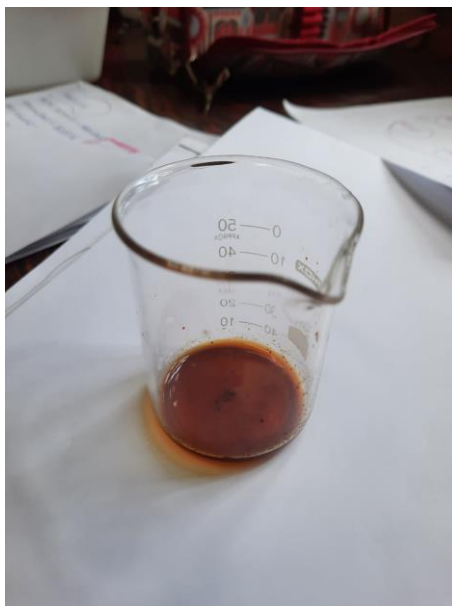
Figura 33 - Biochar produzido a partir dos ensaios de pirólise realizados



Fonte: O autor

A coleta do bio-óleo é realizada no balão coletor conectado à unidade de condensação. A figura 34 apresenta o óleo de pirólise coletado em um dos ensaios realizados.

Figura 34 - Bio-óleo produzido no processo de pirólise lenta



Fonte: SEBBEN *et al.* (2022)

5.7 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DE INTERESSE

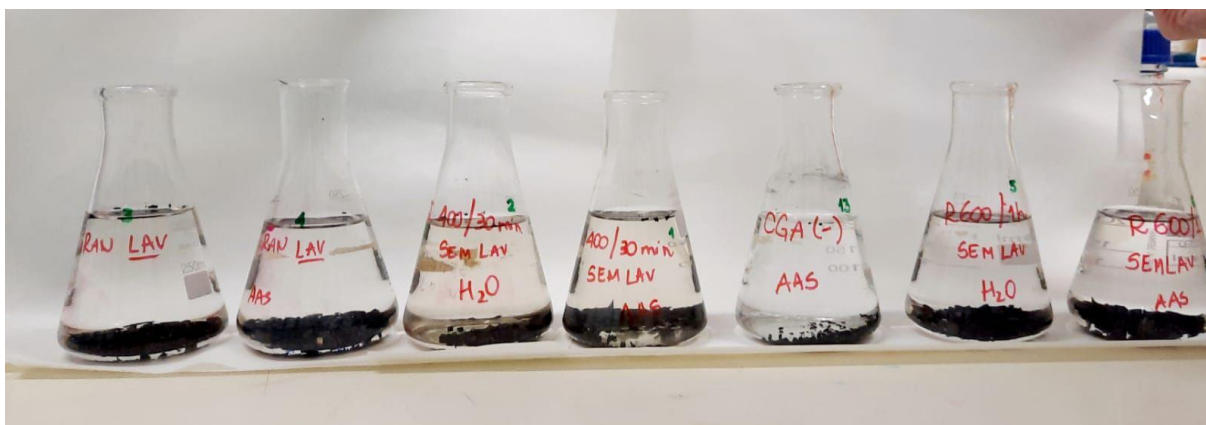
A caracterização do biochar produzido foi realizada via ensaio de adsorção com ácido acetilsalicílico (AAS) e resultou em uma eficiência de remoção média de 62,5% utilizando biochar produzido a partir do o *Eucalyptus saligna* (DORNELES *et al.*, 2021).

Foram realizados diversos ensaios de pirólise para produção de biochar com outras biomassas precursoras e os resultados da caracterização deste biochar produzido a partir da biomassa residual do sisal (*Agave Itaporanga*) atingiu uma remoção do corante Azul de Metileno de aproximadamente 98% em duas horas de contato (SEBBEN *et al.*, 2022).

Cabe pontuar que todos os ensaios de adsorção realizados foram submetidos sob mesma condição de pH e concentração de fármaco. Ainda, os resultados de adsorção do AAS utilizando carvão ativado comercial obtidos por BÓ (2016) apresentaram remoção de 95% do fármaco em 24h de contato.

A figura 35 ilustra as amostras da mistura de biochar e AAS durante o ensaio de adsorção.

Figura 35 - Amostras da mistura de biochar e AAS durante o ensaio de adsorção

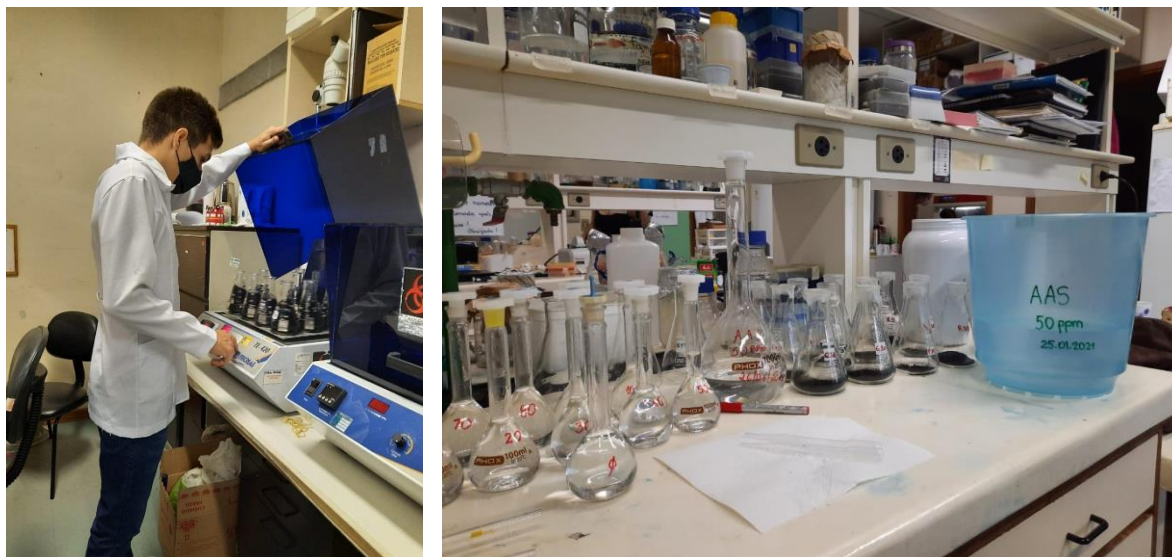


Fonte: O autor

Os resultados alcançados para os carvões produzidos são satisfatórios ponderando sua utilização como material adsorvente para substituição ao carvão ativado comercial quando avaliada a utilização do biochar produzido a partir do Agave.

A figura 36 apresenta um dos ensaios de adsorção realizados.

Figura 36 - Ensaio de adsorção com o biocarvão produzido a partir da pirólise do eucalipto para remoção de AAS



Fonte: SEBBEN *et al.* (2021)

5.8 INVESTIMENTO

A partir da esquematização e construção da planta de pirólise em escala laboratorial avaliando as etapas previstas no processo a unidade foi concluída e iniciou-se a sua operação da planta. O valor total investido no projeto foi de aproximadamente R\$ 5.200 reais, considerando que houve custos não contabilizados como materiais reaproveitados e mão-de-obra.

O valor total apresentado contempla o custo da oficina mecânica do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que realizou os processos de usinagem e solda, além do investimento no cilindro de nitrogênio, tijolos refratários para a construção do forno mufla, sistema de controle de temperatura com os equipamentos da marca Novus, a resistência elétrica confeccionada para aquecimento da planta e materiais de consumo, como parafusos, rebites, arruelas, entre outros.

A tabela 6 apresenta os principais custos do projeto.

Tabela 6 - Principais custos envolvidos no projeto

Equipamento	Quantidade	Valor (R\$)
Reator, Suporte, Agarrador, Mão de obra	-	903,00
Reator (Tramontina)	1,00	149,90
Tijolo Isolante	40,00	388,00
Cilindro de N ₂	50 L	1.100,00
Carga de N ₂	9 m ³	135,00
Regulador N ₂ Famabras	1,00	280,00
Mangueira ar e água 5/16	10 m	20,00
Controlador de Temperatura N1040	1,00	297,15
Controlador de Temperatura N480d	1,00	490,00
Termopar tipo K	1,00	85,00
Termopar tipo K ponta isolada	1,00	108,00
Infusores	5,00	119,50
Regulador com fluxômetro	1,00	390,00
Solda TIG	7 m ³	200,00
Resistência Elétrica	-	304,14
Mangueira de silicone	1,00	18,00
Gaxeta de fibra cerâmica	5,00	30,00
Relé de estado sólido Novus 40 A:	1,00	90,00
Serra fita	1,00	8,00
Bomba de água	1,00	23,00
Condensador de Vidro	1,00	50,00
Agarradores	1,00	30,00
Total (R\$)		5.218,69

Fonte: O autor

Comparando o investimento realizado com o valor estabelecido por empresas de equipamentos científicos, o resultado alcançado para o projeto apresentou uma redução de aproximadamente 74% no valor total que fora orçado para implementação de uma planta de pirólise em escala laboratorial para processamento de diferentes biomassas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste trabalho e os resultados alcançados contribuíram para novas investigações envolvendo o processo de pirólise e o reaproveitamento de resíduos agroindustriais, auxiliando para o manejo destes e agregando valor a novos produtos. São apresentadas algumas publicações vinculadas a este projeto nos anexos deste trabalho.

O desenvolvimento de uma planta laboratorial de pirólise com um baixo custo de investimento, quando comparado a outros orçamentos realizados, robusta, eficiente e que resultou em produtos de qualidade foi alcançado.

A partir da confecção manual e utilizando recursos acessíveis e disponíveis em laboratório, uma redução de aproximadamente 74% foi alcançada e resultou em um investimento próximo de R\$ 5.200.

Visto o domínio de todos os parâmetros do processo de pirólise, é possível realizar a parametrização das condições de contorno desta rota termoquímica e alcançar o produto de interesse desejado a partir do tipo de pirólise a ser processado.

Os ensaios termoquímicos realizados com o resíduo da colheita do eucalipto e suas diferentes partes, e outras biomassas precursoras, foram realizados sob condições de pirólise lenta com o objetivo de produção de biochar. Os valores de rendimento atingidos foram confrontados com as análises termogravimétricas realizadas, avaliando-se boa correspondência entre os resultados.

A caracterização do biochar produzido foi realizada a partir de ensaios de adsorção com Ácido Acetilsalicílico (AAS) e os ensaios de remoção do fármaco atestaram uma remoção de 62,5% com a utilização do biochar produzido a partir do resíduo florestal do *Eucalyptus saligna* e de aproximadamente 98,0% com a utilização do carvão obtido a partir da pirólise do *Agave Itaporanga*, comprovando assim a qualidade dos produtos obtidos e a eficiência da planta implementada.

Nesse sentido, o objetivo de desenvolver e construir uma planta de pirólise eficiente, robusta e de baixo custo em escala laboratorial foi concluído e sendo assim, algumas etapas futuras para a continuidade deste projeto são sugeridas:

- Avaliar os testes com o bio-óleo produzido a partir da pirólise e caracterização deste produto para apuração de sua da qualidade;
- Aplicação de outros tipos de pirólise e ponderação da quantidade de óleo de pirólise produzido;
- Refinamento da configuração da unidade de condensação vislumbrando atingir um maior rendimento na produção de bio-óleo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, S. R. **Pirólise rápida de casca de arroz: estudo de parâmetros e caracterização de produtos.** 2010.

ANDRADE, S. C. *et al.* **Análise dos efeitos da compactação do solo sobre a regeneração das cepas de eucalipto.** Revista *Árvore*, v.24, n.3, p.261-268, 2000.

BILLER, P.; ROSS, A. B. **Hydrothermal processing of algal biomass for the production of biofuels and chemicals.** *Biofuels*, v. 3, n. 5, p. 603-623, 2012.

BÓ, L. G.. **Remoção de ácido acetilsalicílico com a utilização de carvão ativado com biofilme em uma coluna de leito fixo.** 2016.

BRIDGWATER, A. V.; BRIDGE, S. A. **A review of biomass pyrolysis and pyrolysis technologies.** *Biomass pyrolysis liquids upgrading and utilization*, p. 11-92, 1991.

BRIDGWATER, A. V.; MEIER, D.; RADLEIN, D. **An overview of fast pyrolysis of biomass.** *Organic geochemistry*, v. 30, n. 12, p. 1479-1493, 1999.

BRIDGWATER, A. V. **Fast pyrolysis of biomass for energy and fuels.** *Thermochemical conversion of biomass to liquid fuels and chemicals*, p. 146-191, 2010.

BROWN, R. C.; WANG, K. **Fast Pyrolysis of Biomass: Advances in Science and Technology.** Royal Society of Chemistry, 2017.

CALDAS, F. A. **Análise da utilização de usinas de pirólise para geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2019.

CANTO, J. L. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia.** 2009.

CARDOSO, C. R.; PIMENTA, A. S.; DE CANTO, J. L. **Aproveitamento de resíduos de colheita florestal: uma revisão.** *Avanços nas Ciências Florestais*, p. 6. 2022

CHEN, X.; YU, J.; ZHANG, Z.; LU, C. **Study on structure and thermal stability properties of cellulose fibers from rice straw.** Carbohydrate Polymers, v. 85, n. 1, p. 245–250, 2011

CHERUBINI, F. **The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals.** Energy conversion and management, v. 51, n. 7, p. 1412-1421, 2010.

CLAUDINO, A. *et al.* **Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes.** 2003.

COSTANTIN, L. F. *et al.* **Produção de bioadsorvente a partir do resíduo florestal do eucalipto para remoção de ácido acetilsalicílico presente em soluções diluídas.** Salão Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão da Uergs (SIEPEX), v. 1, n. 10, 2021.

CORTEZ, L.; LORA, E.; GOMÉZ, E. **Biomassa para energia:** Campinas/SP: Editora da Unicamp, 2008.

DHYANI, V.; BHASKAR, T. **A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass.** Renewable energy, v. 129, p. 695-716, 2018.

DORNELES, R. H. T.; SEBEN, V. H. A.; RAVA, A. R.; MACHADO, B. F.; COSTANTIN, L. F.; LOPES, F. C.; DUTRA, E. D.; GASPARIN, F. P.; RIES, L. A. S. **Valorização do resíduo florestal do eucalipto através de processamento termoquímico para a produção de bioadsorvente de baixo custo.** Simpósio sobre sistemas sustentáveis, 6., 2021, On-line. Anais [volume 4: Sustentabilidade]. Toledo, GFM, 2021.

EMBRAPA, **Resíduos orgânicos.** 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/58arvão58io-não-e-so-salada/seco58arvão58iuos-organicos>. Acesso em: 30 jan. 2023.

EMBRAPA, **Biodigestão.** Embrapa Suínos e Aves. Disponível em: <https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/biogasfe58arvão58ogas/biodigestao#:~:text=O%20biodigestor%20%C3%A9%20um%20reator,biol%C3%B3gicos%20que%20geram%20%20biog%C3%A1s>. Acesso em: 06 abr. 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Wood energy**. 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/forestry/energy/em/>. Acesso em: 03 jun. 2023

FERREIRA, N. L. **Pirólise de Biomassa Lignocelulósica utilizando diferentes catalisadores para produção de bio-óleo**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

FREITAS, L. C. *et al.* **Avaliação quantitativa de impactos ambientais da colheita florestal em dois módulos**. Revista Ceres, v.54, n.313, p.292-303, 2007.

FREITAS, L.; BUENO, S. M. **Carvão ativo: breve histórico e estudo de sua eficiência na retenção de fármacos**. Revista Científica Unilago, v. 1, n. 2, 2014.

GIANNONI, J.A. *et al.* **GIANNONI, Juliana Audi et al. Aproveitamento de resíduos orgânicos para o desenvolvimento de beijinho a base de mandioca amarela e rosada**. Revista da Associação Brasileira de Nutrição-RASBRAN, v. 8, n. 2, p. 50-57, 2017.

GOMIDE, R. **Operações Unitárias: operações de transferência de massa**. Vol. 4. São Paulo, 1988.

GUEDES, C. L. B. *et al.* **Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina**. Química Nova, v. 33, p. 781-786, 2010.

GUEDES, R. E.; LUNA, A. S.; TORRES, A. R. **Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis: A review**. Journal of analytical and applied pyrolysis, v. 129, p. 134-149, 2018.

IBÁ, **Relatório 2019**. Indústria Brasileira de Árvores. Disponível em: <https://iba.org/datafil59arvão59io5959o59arvão59io59ios/relatorioiba2019-final.pdf>

IBA, **Relatório Anual 2022**. Indústria Brasileira de Árvores. Disponível em: <https://www.iba.org/datafil60arvãio6060o60arvãio60i60arvãio60iorio-anual-iba2022-compactado.pdf>

IOANNIDOU, O. *et al.* **Investigating the potential for energy, fuel, materials and chemicals production from corn residues (cobs and stalks) by non-catalytic and catalytic pyrolysis in two reactor configurations**. Renewable and sustainable energy reviews, v. 13, n. 4, p. 750-762, 2009.

JACOVINE, L. A. G.; MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P.; LEITE, H. G. **Avaliação da perda de madeira em cinco subsistemas de colheita florestal**. Revista Árvore, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 463-470, jul./ago. 2001.

LEE, Y. *et al.* **Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500 C**. Bioresource technology, v. 148, p. 196-201, 2013.

LIU, N. *et al.* **Characterization of biochars derived from agriculture wastes and their adsorptive removal of atrazine from aqueous solution: A comparative study**. Bioresource technology, v. 198, p. 55-62, 2015.

LU, Q.; LI, W. Z.; ZHU, X. F. **Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils**. Energy Conversion and Management, Oxford, v. 50, n. 5, p. 1376–1383, 2009.

MACROVENDA VENTILAÇÃO INDUSTRIAL. **Carvão Ativado**. Disponível em: <http://www.macrovenda.com.60arvãovao-ativado.php>. Acesso em: 26. Mar. 2023.

MARAFON, A. C. *et al.* **Uso da Biomassa para a geração de energia**. 2016.

MIRANDA, I. C. **Aproveitamento Energético a partir de resíduos de biomassa: bagaço e palha de cana-de-açúcar**. Dissertação de Mestrado – TPQB, 2009.

MARIN MESA, L. R. **Estudo da pirólise de cana-de-açúcar integral**. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

MLONKA-MEDRALA, Agata *et al.* **Pyrolysis of agricultural waste biomass towards production of gas fuel and high-quality char: Experimental and numerical investigations.** *Fuel*, v. 296, p. 120611, 2021.

NASCIMENTO, R. A. A. **Caracterização da lignina de bagaço de cana pré-tratado por explosão a vapor: identificação dos compostos de degradação e reações envolvidas.** Tese de Doutorado. Tese (Doutorado)-Curso de Biotecnologia Industrial, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2007.

NASCIMENTO, R. F. do *et al.* **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais.** 2020.

NOLASCO, A. M. **Resíduos da colheita e beneficiamento da caixeta – *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC.: caracterização e perspectivas.** 2000. 171f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000

OLIVEIRA, L. H. *et al.* **Aplicação de carvão ativado no tratamento da água produzida sintética na indústria petroquímica.** Santa Catarina, outubro, 2014.

OGATA, B. H. **Caracterização das frações celulose, hemicelulose e lignina de diferentes genótipos de cana-de-açúcar e potencial de uso em biorrefinarias.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2013.

PAIVA FILHO, J. M. **Projeto preliminar de um reator de pirólise rápida.** 2020.

PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F.; PICKLER, A. C.; LEAL, E. R.; MILHOMEN, C. C. **Produção e tratamento de lodo de esgoto: uma revisão.** *Revista Liberato, Novo Hamburgo*, v. 11, n. 16, p. 89-188, 2010

PENG, F. *et al.* **Fractional purification and bioconversion of hemicelluloses.** *Biotechnology advances*, v. 30, n. 4, p. 879-903, 2012.

PEREIRA, M. F. R.; ÓRFÃO, J. J. M.; FIGUEIREDO, J. L. **Remoção da cor em efluentes da indústria têxtil por adsorção em carvões ativados modificados. Adsorbentes en la solución de algunos problemas ambientales.** 2001.

PIMENTA, F. S. *et al.* **Pirólise de bagaço de malte assistida por micro-ondas.** 2022.

RAYMUNDO, L. M. **Desenvolvimento do processamento por pirólise rápida de resíduos lignocelulósicos para melhoria do bio-óleo.** 2022.

RAMOS, W. F. *et al.* **Geração de resíduos madeireiros do setor de base florestal na região metropolitana de Belém, Pará.** *Ciência Florestal*, v. 28, p. 1823-1830, 2018.

RENNARD, D.; FRESH, F.; CZERNIK, S.; JOSEPHSON, T. **Production of synthesis gas by partial oxidation and steam reforming as biomass pyrolysis oils.** *International Journal of Hydrogen Energy*, v.35, p 4048-4059, 2010.

RODRIGUES, C. R. **Degradação térmica da casca de arroz e utilização do carvão obtido no processo para polimento de águas cinzas.** 2019.

SANTOS, F.A. *et al.* **Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol.** *Química nova*, v. 35, p. 1004-1010, 2012.

SEBBEN, V.H.A. *et al.* **Desenvolvimento de uma planta de pirólise laboratorial de baixo custo.** 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Gramado, RS, 2021.

SEBBEN, V.H.A. *et al.* **Concepção e desenvolvimento de planta pirolítica de baixo custo em escala laboratorial para processamento térmico.** *Engenharia Química: Desenvolvimento de novos processos e produtos.* Ponta Grossa: Atena, p 74-85. 2022.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JUNIOR, E.D. **Compactação do solo devido ao tráfego de máquinas de colheita de madeira.** *Scientia Forestalis* n.60, p. 73-87. 2001.

SILVA, A. L. E. *et al.* **A casca de arroz como fonte de energia em empresas beneficiadoras do grão.** *Exacta*, v. 17, n. 4, p. 375-382, 2019.

SILVA, A.F.V. *et al.* **Cellulase production to obtain biogas from passion fruit (*Passiflora edulis*) peel waste hydrolysate.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 7, n. 6, p. 103510, Pernambuco, 2019.

SILVA, R. C. *et al.* **Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais.** Pesquisa florestal brasileira Colombo, v. 38, e201801573, p. 1-10, 2018.

SILVEIRA, J. H. da *et al.* **Characterization of residual biomass from the harvest of *Eucalyptus saligna* for thermal conversion processes.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental (REGET). Santa Maria, RS: UFSM. Vol. 24, nesp.(2020), e13, 24 p., 2020.

SPEIGHT, J. G. **The refinery of the future.** Gulf Professional Publishing, 2020.

VALÉRIO, Alvaro Felipe *et al.* **Quantificação de resíduos e rendimento no desdobro de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze.** Floresta, v. 37, n. 3, 2007.

VÁSQUEZ, M. P. *et al.* **Enzymatic hydrolysis optimization to ethanol production by simultaneous saccharification and fermentation.** Applied Biochemistry and Biotechnology: The Twenty-Eighth Symposium Proceedings of the Twenty-Eight Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals Held April 30–May 3, 2006, in Nashville, Tennessee. Humana Press, p. 141-153. 2007.

VATRAZ, S.; BORGES, F. Q. **Análise de resíduos florestais após colheita semimecanizada em um plantio de coníferas no paraná.** Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 12, n. 1, p. 65-80, 2019.

WEBER, K.; QUICKER, P. **Properties of biochar.** Fuel, v. 217, p. 240-261, 2018.

WYMAN, Charles E. *et al.* **Coordinated development of leading biomass pretreatment technologies.** Bioresource technology, v. 96, n. 18, p. 1959-1966, 2005.

YAASHIKAA, P. R. *et al.* **Bioconversion of municipal solid waste into bio-based products: A review on valorisation and sustainable approach for circular bioeconomy.** *Science of the total environment*, v. 748, p. 141312, 2020.

ANEXOS

ANEXO A – TRABALHO DE PESQUISA APRESENTADO NO IX SALÃO INTEGRADO DE ENSINO PESQUISA E EXTENSÃO DA UERGS - SIEPEX



DESENVOLVIMENTO DE REATOR LABORATORIAL DE BAIXO CUSTO PARA PIRÓLISE DE DIFERENTES BIOMASSAS

Victor Hugo A. SEBBEN¹, Lúcia A. RIES², Fabiano P. GASPARIN³

1. Discente de Engenharia de Energia e bolsista de Iniciação Científica (UERGS). 2. Docente co-orientador (UERGS)
3. Docente orientador (UERGS)

INTRODUÇÃO

Características da Pirólise:

- Conversão termoquímica;
- Elevadas temperaturas;
- Atmosfera inerte;
- Reaproveitamento de resíduos;
- Produtos: Biochar, Bio-óleo e gases não condensáveis.

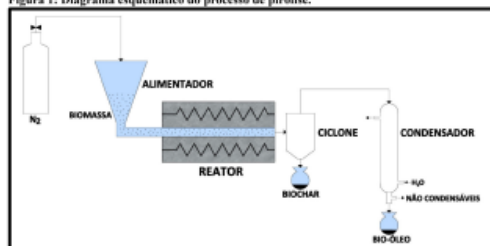
Tabela 1 – Características principais dos diferentes tipos de pirólise.

TIPO DE PIRÓLISE	TAXA DE AQUECIMENTO	TEMPO DE RESIDÊNCIA	PRODUTO MAJORITÁRIO
Lenta	Baixa	Longo	Biochar
Rápida	Alta	Curto	Bio-óleo
Ultra-rápida	Muito alta	Muito curto	Gases não condensáveis

OBJETIVO

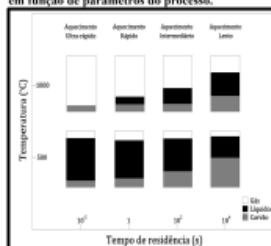
Desenvolvimento de um reator de pirólise de bancada, eficiente para o processamento de diferentes biomassas e de baixo custo, visando à produção de biochar e bio-óleo com propriedades adequadas às aplicações energéticas e não energéticas.

Figura 1: Diagrama esquemático do processo de pirólise.



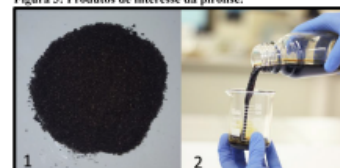
Fonte: O autor.

Figura 2: Distribuição das frações dos produtos em função de parâmetros do processo.



Fonte: Mezerette e Girard (1991).

Figura 3: Produtos de interesse da pirólise.



Fonte: Ries e Silveira (2019); Silva (2019).

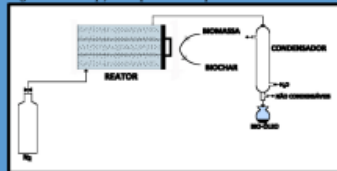
1. BIOCHAR: Excelente adsorvente de Cr(VI).
2. BIO-ÓLEO: Fonte para produção de combustíveis e de insumos químicos de grande demanda e valor agregado.

MATERIAIS E MÉTODOS



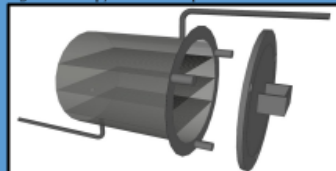
RESULTADOS ESPERADOS

Figura 4: Concepção do processo de pirólise.



Fonte: O autor.

Figura 5: Concepção do reator de pirólise.



Fonte: O autor.

PRINCIPAIS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CORTEZ, L.A.R.; LORA, E.E.; GÓMEZ, F. O. (Orgs.). Biomassa para energia. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2011.
- RAYMUNDO, L.M. Fiação rápida de carvão de arroz em leito fluidizado. 2010. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Rio de Janeiro, 2010.
- SILVA, A. Produção integrada de bio-óleo a partir de lodo. Relatório de Iniciação Científica, 2019. Acesso em: 23/06/2019. Disponível em: <http://repositorio.ufrgs.br/bitstream/handle/10468/10110/1/2019-04-01-1130-0001.pdf>
- MEZERETTE, G., GIRARD, P. Environmental aspects of biomass pyrolysis: a case study on agricultural residues. London, 1995.
- RIES, L.A.S., SILVEIRA, J. B. Remoção de Cr(VI) por adsorção em biochar produzido a partir de resíduos de arroz. 2019. Acesso em: 23/06/2019. Disponível em: <http://repositorio.ufrgs.br/bitstream/handle/10468/10110/1/2019-04-01-1130-0001.pdf>


NOVAS TENDÊNCIAS DE

EDUCAÇÃO,
ECONOMIA CRIATIVA
E SUSTENTABILIDADE.




Fonte: O autor

**ANEXO B – PROJETO DE PESQUISA APRESENTADO NA XV JORNADA DE
INICIAÇÃO CIENTÍFICA - MEIO AMBIENTE**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA
UNIDADE PORTO ALEGRE
XV JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA - MEIO AMBIENTE**



**DESENVOLVIMENTO DE REATOR LABORATORIAL DE
BAIXO CUSTO PARA PIRÓLISE DE DIFERENTES
BIOMASSAS**

Discente: Victor Hugo Andreis Sebhen
Docentes: Lúcia Allebrandt Ries e Fabiano Perin Gasparin

Porto Alegre, 27 de setembro de 2019

Fonte: O autor

ANEXO C – TRABALHO APRESENTADO NO 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA



DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANTA DE PIRÓLISE LABORATORIAL DE BAIXO CUSTO

V.H.A. SEBEN¹, F.P. GASPARIN² e L.A.S. RIES¹

¹ Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, ² Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

E-mail para contato: vhasebben@gmail.com

RESUMO – *O presente trabalho teve por objetivo desenvolver uma planta de pirólise laboratorial de baixo custo para o processamento térmico de diferentes biomassas. Empregando recursos disponíveis no laboratório da Universidade, a planta laboratorial foi construída e colocada em operação. Uma redução de aproximadamente 75% no custo final do reator foi alcançada. Ensaios termoquímicos, em condições de pirólise lenta, foram realizados empregando a biomassa residual oriunda da colheita do eucalipto. Um rendimento médio de aproximadamente 34% foi alcançado para o resíduo. Este valor apresentou boa concordância com o valor obtido pela análise termogravimétrica e com valores encontrados na literatura, demonstrando a eficiência da planta construída.*

1. INTRODUÇÃO

A pirólise é um processo de degradação térmica que ocorre em moderadas temperaturas, na faixa de 300 a 600 °C, na ausência de oxigênio, através do qual materiais orgânicos são convertidos nas fases sólida, líquida e gasosa (SORIA-VERDUGO *et al.*, 2020). É uma tecnologia promissora, que vem recebendo crescente atenção devido a sua flexibilidade em gerar uma combinação de diferentes produtos de elevada qualidade e maior valor agregado (CAMPUZANO, *et al.*, 2019). Uma das grandes vantagens desse processo é a possibilidade de usar vários tipos de matérias-primas, incluindo resíduos industriais, agrícolas, florestais e domésticos (CZAJCZYNSKA *et al.*, 2017).

O rendimento e a qualidade dos produtos gerados são influenciados pela natureza da matéria-prima e pela definição de alguns parâmetros operacionais do processo. A temperatura do reator é o principal fator, contudo outros fatores, tais como a taxa de aquecimento, a granulometria do material de partida, o tempo de residência dos voláteis, o tempo de residência do sólido e o fluxo do gás de arraste são de grande relevância e estão fortemente relacionados com a configuração do reator (LEWANDOSKY *et al.*, 2019). Muitos tipos de reatores podem ser usados para pirólise, incluindo os de leito fixo, leito fluidizado, leito em jorro, cone rotatório, ablativo, forno rotatório, auger, micro-ondas, a vácuo e de plasma, entre outros (SORIA-VERDUGO *et al.*, 2020). Os reatores são usados para diferentes aplicações, dependendo das características da matéria-prima e do produto final desejado, o qual acaba definindo o tipo de pirólise a ser empregada (lenta, intermediária ou rápida) (CAMPUZANO *et al.*, 2019). A

ANEXO D – TRABALHO PUBLICADO NO LIVRO “ENGENHARIA QUÍMICA: DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PROCESSOS E PRODUTOS”

CAPÍTULO 7

CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE PLANTA PIROLÍTICA DE BAIXO CUSTO EM ESCALA LABORATORIAL PARA PROCESSAMENTO TÉRMICO

Data de aceite: 01/06/2022

Data de submissão: 15/05/2022

Victor Hugo Andreis Sebben

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul
Porto Alegre, Rio Grande do Sul
lattes.cnpq.br/9143378982341556

Fabiano Perin Gasparin

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre, Rio Grande do Sul
lattes.cnpq.br/5631639380223151

Lúcia Allebrandt da Silva Ries

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul
Porto Alegre, Rio Grande do Sul
lattes.cnpq.br/0862172420046110

RESUMO: A pirólise de diferentes tipos de biomassa exige um reator que atinja as temperaturas desejadas e que tenha flexibilidade para o ajuste dos diferentes parâmetros operacionais, tais como taxa de aquecimento, tempo de residência e vazão do gás de arraste. Diante do elevado custo de soluções orçadas por empresas de equipamentos científicos, optou-se pela elaboração de um projeto próprio e pela construção, de modo artesanal, de uma planta de pirólise laboratorial, levando em consideração o menor custo possível, a segurança operacional, a robustez nos ensaios, o rendimento e a qualidade dos produtos gerados. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi projetar e construir um reator de pirólise laboratorial de leito fixo e de baixo custo, e comprovar sua eficiência técnica para a

realização de ensaios de pirólise, empregando a biomassa residual da colheita do eucalipto. São apresentadas as soluções técnicas desenvolvidas ao longo da execução do projeto, bem como os resultados alcançados para o rendimento da fase sólida, o biochar, produto de interesse nesse trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Reator de pirólise, baixo custo, processamento termoquímico, biochar, bio-óleo.

CONCEPTION AND DEVELOPMENT OF A LOW COST LABORATORY SCALE PYROLYTIC PLANT FOR THERMAL PROCESSING

ABSTRACT: The pyrolysis of different types of biomasses require a reactor that reaches the desired temperatures and at the same time has the flexibility to adjust different operating parameters, such as heating rate, residence time and carrier gas flow. Considering the high cost presented by scientific equipment companies, it was decided to design and build in the workshops of the university a laboratory pyrolysis plant, taking into account the lowest possible cost, operational safety, robustness in tests, the yield and quality of the products generated. In this context, the objective of this work was to design and build in an artisanal way a low-cost, fixed-bed laboratory pyrolysis reactor, and to prove its technical efficiency for carrying out pyrolysis tests, using residual biomass from the eucalyptus harvest. The technical solutions developed during the execution of the project are presented, as well as the results achieved for the yield of the solid phase, the biochar, product of interest in this work.