

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua
(Organizador)

ENGENHARIA QUÍMICA:

Desenvolvimento de novos
processos e produtos



Atena
Editora
Ano 2022

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua
(Organizador)

ENGENHARIA QUÍMICA:

Desenvolvimento de novos
processos e produtos



Atena
Editora
Ano 2022

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Engenharia química: desenvolvimento de novos processos e produtos

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia química: desenvolvimento de novos processos e produtos / Organizador Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0198-8

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.988221306>

1. Engenharia química. I. Paniagua, Cleiseano Emanuel da Silva (Organizador). II. Título.

CDD 660

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

O e-book: “Engenharia química: Desenvolvimento de novos processos e produtos” é constituído por nove capítulos de livros que apresentaram estudos aplicados a diferentes segmentos industriais e ambientais.

O primeiro capítulo avaliou as propriedades e capacidade de escoabilidade de materiais pulverulentos a base de celulose e lactose na fabricação de medicamentos na forma de comprimidos ou cápsulas, os resultados foram satisfatórios e possibilita a substituição da lactose pela celulose. O segundo trabalho avaliou o processo de cavitação no canal do bico injetor ao se substituir o tipo de combustível em motores que operam a diesel, a viscosidade do combustível e a pressão de injeção foram os fatores que mais influenciaram na cavitação. O terceiro capítulo avaliou diferentes modificações químicas no óleo de soja refinado a partir da reação de inúmeras reações com o intuito de melhorar as características lubrificantes, obtendo-se um lubrificante biodegradável a partir do óleo de soja. O capítulo 4 apresenta o estudo da incorporação do extrato de frutos – cupuaçu – e do mesocarpo do coco de babaçu a fim de conferir atividade antioxidante para biofilmes com potencial utilização em biopolímeros.

O capítulo 5 realizou uma análise bibliográfica de catalisadores e suas propriedades que viabilizam reações de transesterificação heterogênea a fim de obter biocombustíveis. Já o capítulo 6 realizou um estudo apresentando a importância da Espectroscopia Raman como técnica de caracterização de óxidos com propriedades catalíticas. O capítulo 7 apresentou um estudo de desenvolvimento de uma planta pirolítica de baixo custo utilizando resíduos de colheita de Eucalipto como biomassa para a combustão. O capítulo 8 apresentou uma técnica de conversão integral de gás metano em gás carbônico em um reator de leito fixo. Por fim, o estudo de potencialidade de biorremediação utilizando a biomassa de *Chlorella Vulgaris* em processos de tratamento de águas residuárias.

Nesta perspectiva, a Atena Editora vem trabalhando de forma a estimular e incentivar cada vez mais pesquisadores do Brasil e de outros países a publicarem seus trabalhos com garantia de qualidade e excelência em forma de livros, capítulos de livros e artigos científicos.

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua


SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FLUXO DE MISTURAS DE EXCIPIENTES FARMACÊUTICOS

Marlen Ussifati Rocha

Rodrigo Condotta


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213061>

CAPÍTULO 2..... 11

AVALIAÇÃO DO FENÔMENO DE CAVITAÇÃO EM INJETORES DO CICLO DIESEL OPERANDO COM BIODIESEL: MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Luís Felipe Nunes Truta

Boniek Evangelista Leite

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213062>

CAPÍTULO 3..... 24

PREPARAÇÃO DE POTENCIAIS BIOLUBRIFICANTES A PARTIR DE MODIFICAÇÕES QUÍMICAS NO ÓLEO DE SOJA REFINADO

Paulo Roberto de Oliveira


Ana Flávia de Oliveira

Patrick Rodrigues Batista

Carlos Itsuo Yamamoto

Francisco de Assis Marques

Palimécio Gimenes Guerrero Júnior

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213063>

CAPÍTULO 4..... 37


INFLUÊNCIA DO MESOCARPO DE COCO BABAÇU NA FORMAÇÃO DE BIOFILMES ADITIVADOS COM COMPOSTOS ANTIOXIDANTES – CUPUAÇU (*Theobroma grandiflorum*)

Meyrelle Figueiredo Lima

Dennys Correia da Silva

Audirene Amorim Santana

Harvey Alexander Villa Vélez

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213064>


CAPÍTULO 5..... 44





CATALISADORES QUE VIABILIZAM A TRANSESTERIFICAÇÃO HETEROGÊNEA: UMA ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

Priscila Pereira Silva

Thaina Firmino Voltolini

Evandro Roberto Alves

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213065>

CAPÍTULO 6	60
ESPECTROSCOPIA RAMAN <i>IN SITU</i> OU OPERANDO NO ESTUDO DE REAÇÕES CATALISADAS POR ÓXIDOS	
Diego Rodrigues de Carvalho Rômulo Batista Vieira Luelc Souza da Costa	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213066	
CAPÍTULO 7	74
CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE PLANTA PIROLÍTICA DE BAIXO CUSTO EM ESCALA LABORATORIAL PARA PROCESSAMENTO TÉRMICO	
Victor Hugo Andreis Sebben Fabiano Perin Gasparin Lúcia Allebrandt da Silva Ries	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213067	
CAPÍTULO 8	86
GENERALIZED INTEGRAL TRANSFORM TECHNIQUE APPLIED IN METHANE REFORMING PROCESS WITH CARBON DIOXIDE IN FIXED BED REACTOR	
Josiel Lobato Ferreira Emerson Cardoso Rodrigues Dilson Nazareno Pereira Cardoso Wenderson Gomes dos Santos Romero Moreira de Oliveira Bruno Maués Farias João Nazareno Nonato Quaresma Emanuel Negrão Macêdo	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213068	
CAPÍTULO 9	106
BIOREMEDIATION POTENTIAL OF <i>Chlorella vulgaris</i> (CHLOROPHYCEAE) IN CASSAVA-PROCESSING WASTEWATERS	
Verónica de Medeiros Carla Cristina Almeida Loures Conceição Fernandes	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213069	
SOBRE O ORGANIZADOR	112
ÍNDICE REMISSIVO	113

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.

KEYWORDS: Pyrolysis reactor, low cost, thermal processing, biochar, bio-oil.

1 | INTRODUÇÃO

A reutilização de resíduos é um método de grande destaque no âmbito fabril e ambiental tendo em vista a possibilidade de utilizar matérias-primas alternativas em processos industriais, além de auxiliar a conservação do meio ambiente (MANHÃES & HOLANDA, 2008). O processamento termoquímico de biomassas surgiu como uma oportunidade de agregar valor à resíduos de vários segmentos, bem como fortalecer o conceito de economia circular – uma das frentes do desenvolvimento sustentável.

A tecnologia da pirólise apresenta elevado potencial no contexto do reaproveitamento de resíduos, considerando que é possível utilizar diversas biomassas como matéria-prima neste processo. A pirólise é um processo físico-químico de termoconversão no qual a biomassa é aquecida à temperatura na faixa de 400-800°C, em atmosfera não oxidante, produzindo um resíduo sólido rico em carbono denominado de biocarvão ou biochar, uma fração de vapores orgânicos condensáveis também conhecida por bio-óleo e uma fração de vapores não condensáveis constituída basicamente de H₂, CO, CO₂ e CH₄ (KUMAR & SINGH, 2011).

Segundo Silva et al., (2019) a composição química e a proporção das fases produzidas sofrem influência direta dos parâmetros do processo, do tipo de reator e da natureza da biomassa empregada. A temperatura de operação do reator é um dos principais parâmetros. Além deste, a taxa de aquecimento, o tempo de residência, o fluxo de gás de arraste e a granulometria da matéria-prima também influenciam na fração dos produtos da reação (LEWANDOSKY et al., 2019).

A partir da determinação das condições operacionais do processo, é possível caracterizar o tipo pirólise, podendo se enquadrar como pirólise lenta, que faz uso de baixas rampas de aquecimento, tempo de residência elevado e apresenta como produto principal a fração sólida – biochar (PARADELA, 2012); pirólise rápida, que ocorre com alta taxa de aquecimento e curto tempo de processamento, neste caso, o produto majoritário a ser formado é o bio-óleo (BRIDGWATER, 2011); ou, por fim, a pirólise flash que de acordo com Mota et al., (2015) tem como características taxas de aquecimento muito altas e tempo muito baixo de residência da matéria-prima no reator. Este último tipo resulta em maior proporção da fase de gases não condensáveis.

A Tabela 1 apresenta as principais características e os produtos majoritários para cada tipo de pirólise.

Tipo de Pirólise	Taxa de Aquecimento	Tempo de Residência	Produto Majoritário
Lenta	Baixa	Longo	Biochar
Rápida	Alta	Curto	Bio-óleo
Flash	Muito Alta	Muito Curto	Gases não condensáveis

Tabela 1 – Principais características e produtos majoritários de cada tipo de pirólise.

Fonte: O Autor.

As fases líquida e gasosa podem ser empregadas na geração de calor e eletricidade ou serem convertidas, através de rotas químicas, em biocombustíveis e produtos químicos de grande demanda industrial (KABIR & HAMEED, 2017). A fase sólida, por sua vez, é fonte de material carbonáceo de baixo custo, que apresenta múltiplas aplicações, das quais o emprego como material bioadsorvente para remoção de poluentes ambientais vem chamando a atenção dos pesquisadores nos últimos anos (FAKAYODE et al., 2020).

Para o processo de degradação térmica em atmosfera inerte é necessário fazer uso de um reator específico. A depender do produto de interesse, existem diferentes tipos de reatores no mercado, variando entre leito fixo, leito fluidizado circulante, leito fluidizado borbulhante e parafuso (DA SILVA, 2016).

A Figura 1 apresenta uma representação simplificada do processo de pirólise com alimentação contínua da matéria-prima.

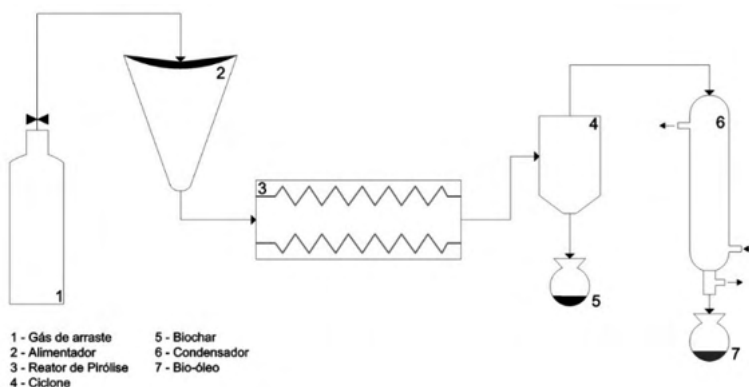


Figura 1 - Concepção básica do processo de pirólise.

Fonte: O autor.

Apesar do grande interesse energético, ambiental e industrial que o processo desperta, ainda existem dificuldades para empregá-lo em larga escala e um dos desafios

que precisam ser enfrentados é o desenvolvimento de reatores mais baratos. A necessidade de reator específico, gás inerte de arraste e elevadas temperaturas elevam o investimento em equipamentos que atendam as premissas dessa tecnologia.

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi desenvolver uma planta de pirólise laboratorial, eficiente e de baixo custo para o processamento termoquímico de diferentes biomassas, de modo a possibilitar o domínio dos diferentes parâmetros do processo, visando atingir rendimentos satisfatórios das frações dos produtos de interesse. Destaca-se, no trabalho, as etapas desenvolvidas durante a execução do projeto e discute-se os resultados obtidos a partir da pirólise lenta para avaliação da eficiência do biochar produzido, produto de interesse nesse trabalho.

2 | METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A concepção do projeto foi idealizada em software de projetos 3D, baseada na revisão de literatura, visando implementar um sistema relativamente simples e de baixo investimento, porém com a segurança e eficiência para o processamento de diferentes tipos de matéria-prima. A construção dos equipamentos foi realizada de forma artesanal em bancada de laboratório utilizando ferramentas manuais e recursos básicos e uma parte em oficina mecânica da universidade com maiores recursos técnicos de construção mecânica.

O reator foi projetado para apresentar robustez e foi desenvolvido a partir de um tubo cilíndrico de aço inoxidável e processos mecânicos convencionais de produção, incluindo solda e usinagem. O reator tem 13 cm de altura e 11 cm de diâmetro, resultando em volume interno aproximado de 1.235 cm³. A entrada e saída de gases é efetuada através de tubos de 6 mm de diâmetro de aço inoxidável soldados na lateral do corpo do reator para serem utilizados como entrada e saída do gás de arraste do sistema. A condução do gás é efetuada por mangueiras de silicone conectadas aos tubos de entrada e saída, este último conduzindo os gases da reação para a unidade de condensação. No corpo do reator foi adaptado um poço termométrico no qual foi inserido um termopar tipo K para medição e controle da temperatura. A tampa do reator foi projetada visando auxiliar na vedação do sistema. Nela foi usinada uma borda interna, a qual serve de base para a colocação de uma vedação de fibra cerâmica para operação até 1100 °C. A tampa é fixada no corpo da câmara do reator por meio de dois parafusos. Além disto, um dispositivo para encaixe da haste de manuseio do reator foi soldado na parede externa do cilindro.

A Figura 2 apresenta a concepção inicial e final do reator de pirólise, respectivamente.



Figura 2 - Concepção inicial e final do reator de pirólise.

Fonte: Sebben et al., 2021.

O aquecimento do reator é realizado por um forno mufla, também construído artesanalmente, constituído de tijolos isolantes 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 até 1350°C. Os tijolos foram dispostos de forma a se encaixarem um no outro e alguns foram serrados para alcançar a disposição necessária. Na parte superior do forno, os tijolos foram unidos por meio de três barras roscadas, visando a sustentação do topo. Os refratários foram perfurados com o auxílio de uma furadeira de bancada e furadeiras manuais. O forno possui uma estrutura composta por perfis de alumínio fixados com parafusos, rebites e unidos por meio de barras roscadas de ¼" de aço galvanizado. A mufla também apresenta outro controlador de temperatura independente com sensor termopar do tipo K para medição da temperatura interna do forno. A Figura 3, abaixo, destaca o projeto do forno mufla em que apresenta o forno com tampa e o reator no interior (a) e o forno sem tampa e sem o reator (b).

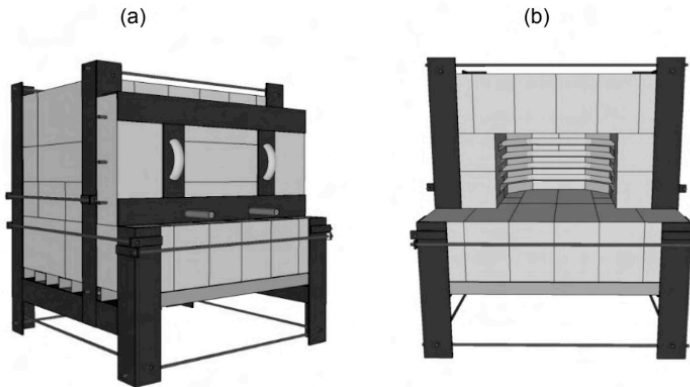


Figura 3 - Projeto do forno mufla.

Fonte: O autor.

O sistema opera em regime de batelada, como reator de leito fixo e a alimentação da biomassa é feita manualmente. Foi desenvolvido um suporte em aço inoxidável, de aproximadamente 10,0 cm de altura e 7,5 cm de diâmetro com cinco aberturas para posicionar os cilindros de contenção da biomassa. Os cilindros são infusores comerciais também em aço inoxidável da marca Tramontina. Com 8,0 cm de altura e 2,2 cm de diâmetro, cada infusor possui um volume interno de 30 cm³. Dessa forma, o volume máximo de biomassa que pode ser introduzida no reator é de 150 cm³. A Figura 4 reflete o suporte da biomassa e os infusores para disposição da matéria-prima.



Figura 4 - Suporte, infusores e conjunto de disposição da biomassa.

Fonte: Sebben et al., 2021.

O forno mufla opera com o uso de resistência elétrica que foi confeccionada a partir de um fio de liga ferrítica de ferro-cromo-alumínio (Fe-Cr-Al) para uso em temperaturas até 1400°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. A resistência foi confeccionada com aproximadamente 21 m de fio com bitola 14 AWG (0,696 Ω /m) que uma vez bobinado em um espiral com 13 mm de diâmetro externo formou

uma resistência de aproximadamente 2 m de comprimento, que foi inserida em canaletas escavadas nos tijolos isolantes. A resistência final possui potência aproximada de 3000 W para operar em tensão de 220 V. Os controladores de temperatura PID utilizados no forno mufla e no reator de pirólise são da marca Novus, modelos N1030-PR e N480D-RP, respectivamente. A temperatura máxima do forno é de 1100°C tendo em vista os materiais utilizados e suas respectivas características.

A Figura 5 apresenta o esquema do projeto elétrico desenvolvido.

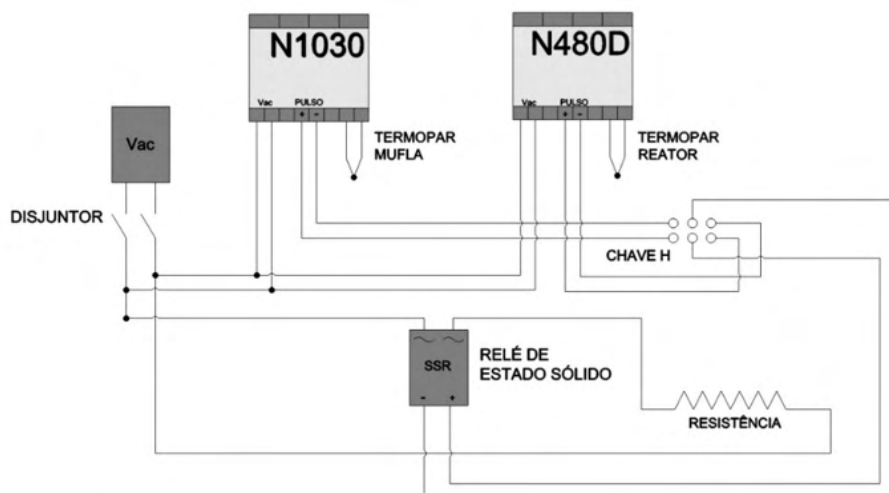


Figura 5 - Esquema do projeto elétrico.

Fonte: Sebben et al., 2021.

Os gases do processo são conduzidos ao sistema de condensação, que possui um condensador de vidro alimentado por um banho termostático de água resfriada à temperatura de 5°C. O bio-óleo produzido é armazenado em balão de vidro acoplado ao condensador e a fração de gases não condensáveis é levada ao exterior do laboratório. O biochar produzido fica retido no interior dos infusores e pode ser coletado após o resfriamento do reator.

Para avaliação da eficiência da planta desenvolvida, foram realizados ensaios de pirólise com a biomassa residual da colheita do eucalipto (*Eucalyptus saligna*), sob condições de pirólise lenta. A biomassa residual foi empregada sob forma de suas diferentes componentes separadamente – casca, folha e galho – e na forma de resíduo com todos os seus componentes, com granulometria média entre 1-5 mm e com umidade de 10%. As condições do processamento estabelecidas foram baseadas em ensaios termogravimétricos previamente realizados em analisador termogravimétrico da TA Instruments SDT Q600, e são definidas a seguir: temperatura de 600 °C, taxa de aquecimento de 20 °C/min, vazão do gás de arraste (N_2) de 1 L/min que considerando o volume do reator equivale a 0,81 L/

dm³.min e tempo de residência na temperatura de 600°C de 60 minutos. Após o ensaio, empregou-se o biochar produzido em ensaios de adsorção com o objetivo de avaliar a eficiência do mesmo frente à remoção de ácido acetilsalicílico (AAS) presente em soluções sintéticas contendo 50 ppm do fármaco.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da confecção do projeto e desenvolvimento das etapas previstas, a planta de pirólise foi concluída e iniciou-se a sua operação. O valor investido na confecção do sistema foi de aproximadamente R\$ 5.200, destacando que há custos que não foram contabilizados no valor total, como materiais reaproveitados e mão-de-obra empregada. O valor total do projeto contempla o custo da oficina mecânica do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que realizou os processos de solda e usinagem, além do custo com o cilindro de nitrogênio, tijolos refratários, sistema de controle de temperatura, resistência elétrica e material de consumo. Quando comparado ao valor estabelecido por empresas de equipamentos científicos, alcançou-se uma redução próxima de 74% no investimento.

A Figura 6 apresenta a concepção final do processo de pirólise implementado.

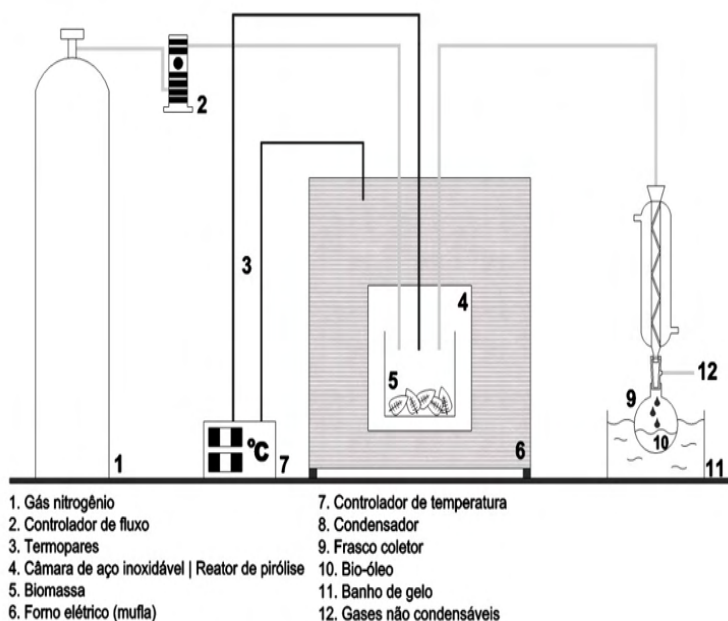


Figura 6 – Concepção final do processo de pirólise.

Fonte: Dorneles et al., 2021.

O reator desenvolvido apresentou boa resposta ao aquecimento e resfriamento, sem

qualquer dano à estrutura do equipamento, além de robustez e segurança operacional. O forno mufla confeccionado também revelou bons resultados considerando o aquecimento e controle da rampa de temperatura e isolamento térmico do sistema. A Figura 7 apresenta o forno mufla e o reator de pirólise desenvolvidos.



Figura 7 - Forno mufla e reator de pirólise desenvolvidos.

Fonte: Sebben et al., 2021.

Os ensaios de pirólise com o *Eucalyptus saligna* realizados apresentaram os seguintes rendimentos gravimétricos para a fase sólida (biochar): 34,29%; 38,96%; 33,86% e 30,06% para o resíduo, cascas, folhas e galhos, respectivamente. A análise termogravimétrica realizada com analisador termogravimétrico forneceu os seguintes valores: 35,54%; 26,07%; 41,43% e 36,08% para o resíduo, cascas, folhas e galhos, respectivamente. Verificou-se boa concordância dos resultados obtidos a partir da pirólise quando comparados com as análises termogravimétricas.

A Figura 8 destaca os produtos de interesse obtidos no processo.



Figura 8 - Bio-óleo e biochar produzidos.

Fonte: O autor.

A caracterização via ensaio de adsorção apresentou uma eficiência de remoção média de 62,5% do ácido acetilsalicílico (AAS) com a utilização do biochar produzido a partir do *Eucalyptus saligna* (DORNELES et al., 2021). Em outros ensaios de adsorção realizados, empregando a biomassa residual do sisal (*Agave itaporanga*), alcançou-se uma remoção do corante azul de metileno de aproximadamente 98% após duas horas de contato.

Após os ensaios de pirólise e de caracterização, a próxima etapa do projeto foi a otimização dos parâmetros de processo. Inicialmente o banho de gelo, da unidade de condensação, era composto por um recipiente com água e cubos de gelo imersos. Posteriormente, substituiu-se por água resfriada a 5°C empregando um banho termostático visando alcançar maior eficiência na condensação do bio-óleo.

A Figura 9 destaca a disposição final da planta pirólítica em escala laboratorial desenvolvida.



Figura 9 – Concepção final da planta de pirólise laboratorial desenvolvida.

Fonte: O autor.

4 | CONCLUSÕES

O desenvolvimento de uma planta de pirólise em escala laboratorial de baixo custo, eficiente, robusta e com produtos de qualidade foi concluído. A partir da confecção artesanal e com os recursos disponíveis no laboratório foi possível atingir uma redução de 74% quando comparado aos equipamentos disponíveis no mercado.

Com o domínio de todos os parâmetros do processo, é possível parametrizar as condições de contorno visando o produto de interesse a ser produzido (biochar ou bio-óleo).

Ensaio de pirólise foram realizados com o resíduo do eucalipto e seus componentes,

sob condições de pirólise lenta, visando a produção de biochar. Os valores de rendimento alcançados foram comparados aos obtidos através de análises termogravimétricas realizadas, verificando-se boa correspondência entre ambos. Ainda, ensaios de adsorção do fármaco ácido acetilsalicílico (AAS) atestaram a remoção de 62,5% com a utilização do biochar produzido a partir da pirólise do resíduo do eucalipto comprovando a qualidade dos produtos obtidos e a eficiência da planta projetada.

As próximas etapas do trabalho visam testes com o bio-óleo produzido para avaliar a qualidade deste produto.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer à Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS) pela bolsa de pesquisa fornecida, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela colaboração no desenvolvimento do projeto e ao técnico Dirceu Adair Bueno Júnior do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo apoio no projeto.

REFERÊNCIAS

BRIDGWATER, A. V. **Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading.** Biomass and Bioenergy, Birmingham, v. 38, p. 68-94, 2011.

DA SILVA H. D. F. **Dimensionamento de um reator piloto para pirólise de biomassa.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2016.

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.

FAKAYODE, O. A.; ABOGARIBA, E. A. A.; ZHOUA, C.; MAA, H. **Co-pyrolysis of lignocellulosic and macroalgae biomasses for the production of biochar – A review.** Bioresource Technology, v.297, p.1-14, 2020.

FÉLIX, C. R. O.; JÚNIOR, A. F. A.; FREITAS, C. C.; PIRES, C. A. M.; TEIXEIRA, V.; FRETY, R.; BRANDÃO, S. T. **Pirólise rápida de biomassa de eucalipto na presença de catalisador Al-MCM-41.** Revista Matéria, Rio de Janeiro, Suplemento, 2017.

FILHO, A.; FERREIRA, A.; MELO, G.; LANGE, L. **Tratamento de resíduos de serviços de saúde pelo processo da pirólise.** Revista Engenharia Sanitária Ambiental, Belo Horizonte, v.19, n. 2, p. 187-194, 2014.

KABIR, G.; HAMEED, B. H. **Recent progress on catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass to high-grade bio-oil and bio-chemicals.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Penang, v.70, p. 945-967, 2017.

KUMAR, S.; SINHG, R. K. **Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis.** Brazilian Journal of Chemical Engineering, Rourkela, v. 28, n. 4, p. 659-667, 2011.

LEWANDOWSKI, W. M.; JANUSZEWICZ, K.; KOSAKOWSKI, W. **Efficiency and proportions of waste tyre pyrolysis products depending on the reactor type - A review.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Gdańsk, v. 140, p. 25-53, 2019.

MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. **Caracterização e classificação de resíduo sólido “pó de rocha granítica” gerado na indústria de rochas ornamentais.** Revista Química Nova, Rio de Janeiro, v. 31, n. 6, p. 1301-1304, 2008.

MOTA, F. D. A. S.; VIEGAS, R. A.; DA SILVA LIMA, A. A.; DOS SANTOS, F. F. P.; CASELLI, F. D. T. R. **Pirólise da biomassa lignocelulósica: Uma revisão pyrolysis of lignocellulose biomass: A review.** Revista GEINTEC, Teresina, v.5. n. 4. p.2511-2525, 2015.

PARADELA, F. M. R. **Estudo da pirólise de misturas de resíduos de plásticos, pneus e biomassa.** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Química e Bioquímica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

SEBBEN V. H. A.; GASPARIN, F. P.; RIES L. A. S. **Desenvolvimento de uma planta de pirólise laboratorial de baixo custo.** congresso brasileiro de engenharia química, 23., 2021, Gramado. Anais eletrônicos. Campinas, Galóá, 2021.

SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. **Valorization of Eucalyptus urograndis wood via carbonization: product yields and characterization.** Energy, Uberlândia, v. 172, p. 509-516, 2019.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Acetilação 24, 25, 28, 32, 33
Ácidos graxos 28, 30, 45, 52
Adsorb 88
Aeração 2, 4, 5, 7
Agência Nacional de Petróleo (ANP) 29, 34
Alimentos 37, 39, 43, 44, 86
Análise da fluidez 2
Antioxidante 37, 38, 40, 41
Atividade catalítica 46, 47, 49, 52, 53, 54, 61, 68

B

Bico injetor 11, 14, 15, 16, 19, 20, 22
Biochar 74, 75, 76, 77, 80, 81, 82, 83, 84
Biocombustíveis 12, 23, 34, 44, 45, 59, 76
Biodegradáveis 24, 26, 37, 38, 43
Biodiesel 11, 12, 13, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 34, 35, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 106, 107
Biofarmacêuticas 2
Biofilmes 37, 40, 42
Biolubrificantes 24, 26, 28, 33, 34, 36
Biomassa 12, 45, 74, 75, 79, 80, 83, 84, 85, 106, 107
Bio-óleo 74, 75, 76, 80, 82, 83, 84
Biopolímeros 37, 43
Bioremediation 106, 107, 109, 110
Boudouard 86, 88

C

Carbon dioxide 86, 87, 90, 98, 101, 102, 104, 105
Catalisadores 27, 44, 46, 47, 49, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 68, 69, 72
Catálise 44, 47, 48, 49, 51, 54, 55, 56, 57, 59, 60, 61, 68, 72
Cavitação 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23
Chlorella vulgaris 106, 107, 110
Cisalhamento 2, 4, 5, 7, 8

Combustíveis 11, 12, 24, 25, 26, 36, 45, 56
Coupled Integral Equations Approach (CIEA) 86, 93
Cupuaçu 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43

D

Densidade relativa 26, 29, 30, 31, 32, 33
Diesel 11, 12, 13, 16, 20, 22, 23, 34, 35, 36, 44, 45, 68

E

Efeito Raman 61
Epoxidação 24, 27, 29
Escoabilidade 1, 3
Espalhamento Raman 62, 63, 64
Espectroscopia Raman 60, 61, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 72, 73
Excipientes farmacêuticos 1, 2, 6

F

Fármacos 1, 2, 3, 37, 38, 39
Fóton 62, 64

G

Gás de arraste 74, 75, 77, 80
Generalized Integral Transform Technique (GITT) 86, 87, 95

H

Hidroxilação 24, 31

I

Injeção 4, 11, 12, 13, 20, 21, 22, 23

L

Lactuca sativa 106, 107, 108

M

Materiais pulverulentos 1, 2
Matrizes energéticas 44
Microcelulose 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 3
Modelo de Schnner e Sauer 11, 16
Monocromadores 65

Motores 11, 12, 13, 32, 35, 45

N

Não-renováveis 11

O

Óleos vegetais 12, 24, 26, 45, 47, 49, 58

Óxidos 44, 46, 47, 50, 52, 54, 60

P

Petróleo 12, 25, 29, 34, 44, 45

Phytotoxicity 106

Pirólise 74, 75, 76, 77, 78, 80, 81, 82, 83, 84, 85

Ponto de fluidez 26, 29, 30, 31, 32, 33, 34

Ponto de fulgor 26, 29, 30, 31, 32

Porosidade 2, 3, 5, 6, 48, 50, 54

Propriedades fenomenológicas 2

R

Renováveis 11, 12, 25, 44

Reômetro 4

Resíduos 34, 53, 55, 57, 75, 84, 85, 112

Reutilização 49, 52, 54, 75, 112

T

Termoconversão 75

Toxicidade 26, 45, 106, 107

Transesterificação heterogênea 44

Triglicerídeos 29, 45, 47, 48, 51, 55

V

Viscosidade 11, 12, 13, 16, 19, 20, 22, 24, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 47

W

Wastewaters 106

Z

Zeólitas 44, 46, 47, 54, 56, 57, 58

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ENGENHARIA QUÍMICA:

Desenvolvimento de novos
processos e produtos



 **Atena**
Editora
Ano 2022

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ENGENHARIA QUÍMICA:

Desenvolvimento de novos
processos e produtos