



**TORREFAÇÃO DE BLENDA DE MADEIRA DE CONSTRUÇÃO E
RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS PARA USO ENERGÉTICO**

THAÍS BARBOSA

**PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**TORREFAÇÃO DE BLENDA DE MADEIRA DE CONSTRUÇÃO E
RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS PARA USO ENERGÉTICO**

THAÍS BARBOSA

Orientador: PROF. DR. EDGAR AMARAL SILVEIRA, ENM/UNB

PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**PUBLICAÇÃO ENM.PG -XXX/AAAA
BRASÍLIA, 26 DE SETEMBRO DE 2022**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**TORREFAÇÃO DE BLENDA DE MADEIRA DE CONSTRUÇÃO E
RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS PARA USO ENERGÉTICO**

THAÍS BARBOSA

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

APROVADO POR:

Prof. Dr. Edgar Amaral Silveira,
UnB/FT/ENM
Orientador

Prof. Dra. Simone Monteiro e Silva,
UnB/FT/ENM
Examinador interno

Me. Luiz Gustavo Oliveira Galvão,
MAPA/SFB/LPF
Examinador externo

BRASÍLIA, 26 de SETEMBRO de 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

THAÍS BARBOSA

TORREFAÇÃO DE BLENDS DE MADEIRA DE CONSTRUÇÃO E RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS PARA USO ENERGÉTICO

2022xv, 71 p.,201x297 mm

(ENM/FT/UnB, Engenheiro Mecânico, Engenharia Mecânica, 2022)

Projeto de Graduação - Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

THAÍS BARBOSA (2022) TORREFAÇÃO DE BLENDS DE MADEIRA DE CONSTRUÇÃO E RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS PARA USO ENERGÉTICO. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, Publicação xxx/AAAA, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 71 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: THAÍS BARBOSA

TÍTULO: TORREFAÇÃO DE BLENDS DE MADEIRA DE CONSTRUÇÃO E RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS PARA USO ENERGÉTICO.

GRAU: Engenheiro Mecânico ANO:2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta projeto de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor se reserva a outros direitos de publicação e nenhuma parte deste projeto de graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

THAÍS BARBOSA

barbosa31thais@gmail.com

Agradecimentos

Primeiramente, gratidão a Deus por ser meu refúgio e minha fortaleza. Chegar aqui não tem sido nada fácil, o caminho é longo e a caminhada continua. Que o Senhor siga me guiando nesta jornada. Agradeço à minha mãe Rosângela por ser minha maior motivação e à minha família na Fundação Abel Gomes que sempre me amou, principalmente meus queridos pais de coração Isaura (em memória) e Manuel (em memória), minhas maiores referências, e, claro, minha sobrinha Heydiane. Grata aos meus amigos (Wellington, Gustavo, Alexandre, Syntia e Clemência) pelo apoio moral e incentivo. Pessoas maravilhosas, anjos que Deus colocou em meu caminho durante essa jornada universitária e que vou levar para o resto da minha vida. Sou grata à Olivia, Emílio (em memória) e Waldemiro por terem me recebido aqui em Brasília. E por fim, agradeço meu orientador Egdar A. Silveira, a todo o pessoal do Laboratório de Produtos Florestais, em especial ao supervisor Bruno S. Chaves pela paciência, dedicação e por compartilhar conhecimento durante esse processo de formação.

Resumo

A matriz energética está em fase de transição. Assim, a pesquisa por novas fontes renováveis tende a crescer. A construção civil é uma das áreas mais importantes para o desenvolvimento econômico e social. A indústria da construção consome 25% de toda a madeira, um elemento essencial utilizado em diferentes formas e etapas na edificação. Contudo, a construção é uma geradora de resíduos. No Brasil estima-se que 98% do resíduo de construção civil (RCC) poderiam ser reciclados. No entanto, apenas 21% têm um destino final correto; 15% de todo resíduo de construção é resíduo de madeira, uma biomassa nobre que tem um potencial para uso energético. A biomassa lignocelulósica é considerada como um biocombustível neutro em emissões de carbono. Diante do desperdício desse recurso abundante, surgiu o interesse de aproveitá-lo para transformar em um novo produto ou processo. A biomassa apresenta algumas limitações para uso energético; possui alto teor de umidade, baixo poder calorífico, baixa densidade entre outras barreiras. Além das limitações da biomassa, os resíduos de madeira da construção contêm entre 1 a 2% de materiais não lenhosos, elementos que aumentam o teor de cinzas no processo de combustão, que pode causar corrosão e escória nas máquinas, e reduz sua vida útil e a eficiência. A madeira de Pinus do RCC tem um teor de cinzas de 1,48% - relativamente maior que a madeira de Pinus in natura, que apresenta média de 0,46%. Nos últimos anos, pesquisas relacionadas ao processo de torrefação cresceram exponencialmente. A aplicação desse tratamento busca o aprimoramento energético da biomassa, transformando-a em um biocombustível sólido como alternativa para substituição parcial ou completa do carvão mineral. O presente trabalho foi desenvolvido com metodologias estatísticas como o planejamento experimental e a superfície de resposta (RSM) para a otimização do processo de torrefação e do produto final. Para aproveitar o resíduo e suprir a demanda, a formação de blendas é uma possível solução. Utilizou-se o RSM com o delineamento composto central e analisou-se os resultados experimentais mediante a análise de variância e análise dos gráficos de superfície e contorno de resposta das interações dos fatores temperatura, tempo e proporção de blenda. Com os gráficos da superfície de resposta obtida a partir de dados experimentais vê-se que há evidência de que o rendimento gravimétrico e energético diminui conforme a severidade do processo de torrefação; com a temperatura severa do processo e uma maior proporção de madeira de RCC contribui significativamente para o aumento do teor de cinzas. Os resultados obtidos mostram que os melhores parâmetros para o processo de torrefação e com máximo de aproveitamento desse resíduo foi com temperatura de 220°C, um tempo de residência de 44,05min uma blenda com 69,6% de resíduo de madeira de construção civil e 30,4% de madeira de eucalipto. A Blenda ótima obteve rendimento gravimétrico de 96,37%,

energético de 98,09% e menor teor de cinzas (1,38%). Nos próximos trabalhos deve ser investigado o impacto ambiental causado pelos gases emitidos durante a combustão da blenda otimizada, e os gases emitidos no aterro sanitário devido ao aterramento do resíduo de madeira. Caso a blenda seja enquadrada como fonte renovável, e a combustão tiver impacto ambiental igual ou menor com relação ao aterramento, é interessante a compactação do produto. O Brasil possui condições vantajosas e tem capacidade de aproveitar uma diversidade de resíduos para fins energéticos, sem sobrecarregar as florestas energéticas e comprometer o fornecimento de madeira nas indústrias de construção civil, moveleira, de papel, entre outros setores.

Palavras-chave: Resíduos de madeira da construção. Torrefação. Blendas de biomassa. MSR.

Abstract

The energy matrix is in a transition phase. Thus, the search for new renewable sources tends to grow. Civil construction is one of the most important areas for economic and social development. The construction industry consumes 25% of all wood, an essential element used in different forms and stages of construction. Although, construction is a waste generator. In Brazil, it is estimated that 98% of civil construction waste (CW) could be recycled. However, only 21% have a correct final destination; 15% of all construction waste is wood waste, a noble biomass that has potential for energy use. Lignocellulosic biomass is considered a carbon neutral biofuel. Faced with the waste of this abundant resource, the interest arose in taking advantage of it to transform it into a new product or process. Biomass has some limitations for energy use; it has a high moisture content, low calorific value, low density, among other barriers. In addition to the limitations of biomass, wood construction waste contains between 1 and 2% of non-woody materials, elements that increase the ash content in the combustion process. Which can cause corrosion and slag on machines, and reduce their life and efficiency. CW pine wood has an ash content of 1.48% - relatively higher than fresh pine wood, which has an average of 0.46%. In recent years, research related to the torrefaction process has grown exponentially. The application of this treatment seeks to improve biomass energy, transforming it into a solid biofuel as an alternative for partial or complete replacement of coal, the optimization of the torrefaction process and the final product. To take advantage of the residue and supply the demand, the formation of blends is a possible solution. The RSM was used with the central composite design and the experimental results were analyzed by means of analysis of variance and analysis of surface and contour plots of response of the interactions of the factors temperature, time and blend proportion. With the response surface graphs obtained from the experimental data, there is evidence that the gravimetric and energy yield decreases with the severity of the torrefaction process, with the severe temperature of the process and a higher proportion of CW wood contributes significantly to the increase of ash content. The results obtained show that the best parameters for the torrefaction process and with maximum use of this residue were with a temperature of 220°C, a residence time of 44.05min, a blend with 69.6% of civil construction wood residue and 30.4% eucalyptus wood. The optimal Blenda obtained gravimetric yield of 96.37%, energy yield of 98.09% and lower ash content(1.38%). In the next works, the environmental impact caused by the gases emitted during the combustion of the optimized mixture, and the gases emitted in the sanitary landfill due to the landfill of the wood residue, should be investigated. If the blend is classified as a renewable source, and the combustion has an environmental impact equal to or less than that of grounding, it is interesting to compact the product. Brazil has advantageous conditions and is able to take advantage of a variety of waste for energy purposes, without overloading energy forests and compromising the

supply of wood in the civil construction, furniture, paper industries, among other sectors.

Keywords: Construction Wood Waste. Torrefaction. Biomass blends. RSM.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Publicações o decorrer dos anos	16
Figura 2 – Diagrama de geração de resíduos de madeira.	20
Figura 3 – Composição dos RCC.	23
Figura 4 – Agregados da construção civil	24
Figura 5 – Incidência dos contaminantes nos resíduos de madeira de construção	24
Figura 6 – Esquema do processo termoquímico e das suas classificações	30
Figura 7 – Evolução dos parâmetros temperatura, umidade, massa e energia térmica demandada em função das diferentes etapas da torrefação	32
Figura 8 – Modelo geral de um processo	36
Figura 9 – Planejamento composto central para três fatores.	37
Figura 10 – Sistema da metodologia adotada no trabalho	39
Figura 11 – Preparo da amostra dos resíduos de madeira da construção civil	40
Figura 12 – Preparo do material cavaco de <i>Eucalyptus Sp.</i>	40
Figura 13 – Procedimentos para análise do teor de material volátil	41
Figura 14 – Procedimentos para análise do teor de cinzas	42
Figura 15 – Confecção dos pellets	43
Figura 16 – Equipamentos para o processo de torrefação	44
Figura 17 – Planejamento de experimento RSM-CCD	46
Figura 18 – Blendas Torreficadas	49
Figura 19 – Gráfico de valores da variável resposta previstos para cada ensaio pelo modelo quadrático ajustado versus o valor experimental observado.	53
Figura 20 – Gráficos de superfície e contorno de resposta das interações entre (a) tempo e temperatura, (b) temperatura e proporção da blenda e (c) tempo e proporção da blenda para o rendimento gravimétrico.	56
Figura 21 – Gráficos de superfície e contorno de resposta das interações entre (a) tempo e temperatura, (b) temperatura e proporção da blenda e (c) tempo e proporção da blenda para o rendimento energético.	57
Figura 22 – Gráficos de superfície e contorno de resposta das interações entre (a) tempo e temperatura, (b) temperatura e proporção da blenda e (c) tempo e proporção da blenda para o rendimento cinza.	58

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação e destinação dos resíduos da construção civil	21
Tabela 2 – Propriedades da celulose, hemicelulose e lignina na biomassa	27
Tabela 3 – Transformação físico-química e variações de propriedades da biomassa antes e depois da torrefação	33
Tabela 4 – Parâmetros independentes RSM-CCD, níveis de fatores codificados e respostas do modelo.	45
Tabela 5 – Análise química imediata e poder calorífico	47
Tabela 6 – Proporção da blenda	49
Tabela 7 – Poder calorífico da biomassa torrefada	50
Tabela 8 – Planejamento experimental	51
Tabela 9 – ANOVA: Modelo quadrático para RG,RE e cinzas	54
Tabela 10 – Blendas otimizadas	59

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivação e caracterização	13
1.2	Aplicações	15
1.3	Objetivo Geral	15
1.3.1	Objetivos específicos	15
1.4	Análise Bibliométrica	16
1.5	Estrutura do Trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Contexto energético e ambiental	18
2.2	Resíduos de madeira	19
2.3	Construção civil	20
2.3.1	Resíduo de madeira na construção civil	24
2.4	Biomassa	25
2.4.1	Biomassa lignocelulósica	25
2.4.1.1	Composição elementar e bioquímica	26
2.4.1.2	Propriedades energéticas	27
2.4.1.3	Limitações para uso energético.	28
2.5	Conversão termoquímica	29
2.6	Torrefação	31
2.6.1	Processo de torrefação	31
2.6.2	Subprodutos da Torrefação	34
2.7	Otimização do Processo de Torrefação	34
2.7.1	Planejamento de experimentos	35
2.7.2	Metodologia de superfície de resposta	36
3	MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1	Preparação das amostras	39
3.2	Caracterização química da biomassa “in natura”	41
3.2.1	Análise química imediata	41
3.2.2	Análise elementar	43
3.2.3	Poder Calorífico Superior	43
3.3	Torrefação	43
3.4	Otimização de torrefação: Metodologia de superfície de resposta	45
4	RESULTADO E ANÁLISE	47

4.1	Caracterização da biomassa “in natura”	47
4.2	Otimização da Torrefação:RSM	49
4.2.1	Blendas torrificadas	49
4.2.2	Planejamento experimental e análise de superfície de resposta	50
4.2.3	Blenda otimizada	58
4.3	Desafios e direções futuras	59
5	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	62

1 Introdução

1.1 Motivação e caracterização

O uso de recursos energéticos é um dos principais fatores que afetam diretamente o meio ambiente. No contexto em que vivemos, existe uma grande preocupação com a origem dos recursos que consumimos. Com o crescimento do consumo de combustíveis fósseis, houve um grande aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera, causando grandes impactos no meio ambiente e no bem-estar da população (HINRICHS; KLEINBACH, 2003).

Do ponto de vista da segurança energética, o aumento da participação das fontes renováveis traz importantes desafios (DELGADO; FILGUEIRAS, 2022). Segundo Antônio Guterres, secretário-geral da ONU, a energia renovável pode salvar o mundo da crise climática. Para fazer isso, devemos acabar com a poluição causada pelo uso de combustíveis fósseis e acelerar a transição da matriz energética para as fontes renováveis (ONU-BR, 2022).

A biomassa é um recurso energético abundante que cobre grande parte da superfície da Terra e tem um ciclo de vida curto, sendo assim uma alternativa para substituir parcialmente ou completamente o carvão mineral (CHEN; LIN, B.-J. et al., 2021). A biomassa lignocelulósica tem um enorme potencial para a produção sustentável de biocombustíveis de segunda geração, como bioetanol, biobutanol, biohidrogênio, bio-óleo, biohidrogênio, biometano e gás de síntese (OKOLIE et al., 2021).

Por outro lado, o crescimento da indústria da construção civil é de grande importância para a manutenção e sustentação da economia brasileira (OLIVEIRA, F. d. A. et al., 2020). Nela é utilizadas grandes quantidades de recursos naturais, que geram volume expressivo de resíduos. O desperdício na construção é considerado de alto volume e baixo risco. Parte desses resíduos é depositado em locais impróprios e de maneira irregular, sem qualquer rastreabilidade (CAVALCANTI; ALVES, 2018).

Os resíduos de construção civil podem ser reutilizados ou reciclados. O resíduo de madeira, especificamente, é uma fonte de biomassa que possui aplicações de valor econômico e pode ser agregado ao mercado para uso energético. Apesar das qualidades no âmbito da sustentabilidade apresentadas acima, existem alguns fatores que dificultam o uso da biomassa como combustível. Alguns destes fatores como a baixa densidade, o baixo calor específico, o alto teor de umidade e de oxigênio, a higroscopicidade e a heterogeneidade fazem com que o biocombustível gerado a partir da biomassa não seja tão atrativo (CHEN; PENG; BI, 2015).

Além das limitações da biomassa para uso energético, os resíduos de madeira advindos de construções são contaminados por outros elementos como argamassa, tinta, pregos metálicos entre outros contaminantes (LOPES; PEREIRA; HAMAYA, 2013). Esses elementos podem gerar um aumento no teor de cinzas no processo de combustão, causando corrosão e escória nas máquinas (reator, turbinas, entre outros), reduzindo sua vida útil e eficiência (SADDAWI et al., 2012)

Nos últimos anos, processos termoquímicos (torrefação, pirólise, gaseificação) obtiveram destaque na busca por possibilidades de melhorar as características da biomassa para a produção de biocombustíveis (IVANOVSKI et al., 2022). A torrefação atraiu muita atenção, pois pode efetivamente atualizar a biomassa sólida e produzir combustível semelhante ao carvão, tendo um menor potencial de aquecimento global (CHEN; LIN, B.-J. et al., 2021). A conversão de resíduos em energia é um dos métodos alternativos mais promissores nas estratégias de gestão de resíduos (NANDHINI et al., 2022).

Um dos gargalos para a implantação dos resíduos de madeira na matriz energética nos grandes centros urbanos é a disponibilização contínua da matéria-prima para suprir a demanda. Assim, uma possível solução para se ter um volume de suprimentos constante é a combinação de diferentes fontes de biomassa, compondo uma mistura (SILVEIRA, E. A.; SANTANNA et al., 2022).

Para avaliar se a mistura desses resíduos lignocelulósicos terá uma eficiência energética faz-se necessária uma investigação. Para que isso ocorra sem custos financeiros significativos, gastos de energia e desperdício de matéria-prima é indicada a realização de um planejamento experimental. Ao analisar os parâmetros do processo de torrefação com a metodologia de superfície de resposta, é possível avaliar a significância estatística dos efeitos dos parâmetros que estão sendo avaliados, por meio de uma equação modelo via teste F para análise de variância, que, no que lhe concerne, oferece uma boa representação dos dados experimentais para o biocombustível sólido.

O trabalho que foi realizado visa reduzir o desperdício e aproveitar o resíduo de madeira proveniente de construção como fonte renovável, buscando a valorização energética dessa biomassa. Uma das alternativas investigadas para diminuir o teor de cinzas foi a formação de blendas com madeira *Pinus* proveniente da construção civil com outro resíduo sem impurezas (Cavaco de Eucalipto sp.) utilizando técnicas de pré-tratamento (Torrefação) para melhorar a qualidade do biocombustível. Ao final do experimento foi realizada uma análise do melhor tratamento de torrefação considerando a proporção das blendas com menor teor de cinzas e maior rendimento energético e gravimétrico.

1.2 Aplicações

A Construção civil é alavanca para crescimento, uma das áreas mais importantes para o desenvolvimento econômico e social. No DF, nos canteiros de obras espalhados em diversos bairros, a construção civil tem visto um momento de aquecimento econômico, mesmo com a pandemia (CUNHA, 2022). A indústria é, no entanto, uma grande geradora de resíduos.

A biomassa é um resíduo de natureza orgânica. Em processo de apodrecimento, a madeira libera todo carbono de volta à atmosfera, contribuindo para a emissão de gases de efeito estufa (GEE). A valorização do resíduo de madeira é uma solução sustentável. Biomassa oriunda da trituração de madeira proveniente da construção civil pode ser utilizada para queima em fornos, caldeiras, para secagem de grãos, produção de pellets, briquetes, entre outros (MARTINS, 2020; MAESTRELLO, 2021).

O presente estudo cresce de importante, uma vez que os resíduos de madeira podem ser convertidos em subprodutos de alto valor agregado. Com o processo de torrefação a biomassa pode se transformar em biocombustíveis sólidos com alto grau de eficiência energética, gerando um produto final de alta qualidade energética, com maior poder calorífico do que a biomassa in natura, proporcionando benefícios significativos em transporte, logística, manuseio e armazenagem e que pode ser inserido na matriz energética brasileira.

1.3 Objetivo Geral

- Produção e otimização (intensificação energética) de biocombustível (blendas) constituído de resíduo de madeira de construção civil e eucalipto (floresta energética) com intuito de obter um produto torrefado com menor teor de cinzas e maior rendimento energético e gravimétrico.

1.3.1 Objetivos específicos

- Caracterizar as propriedades energéticas das biomassas in natura (resíduos de construção civil e cavaco de eucalipto).
- Utilizar o processo de torrefação para melhorar a qualidade energética do resíduo, realizando interação entre os fatores temperatura, tempo de tratamento e proporção da blenda, com o DoE.
- Identificar os melhores parâmetros em relação à temperatura de torrefação, tempo de residência e proporção das blendas para produzir um biocombustível otimizado,

a partir da metodologia de superfície de resposta.

1.4 Análise Bibliométrica

A seleção e busca de referencial bibliográfico com reconhecimento científico e artigos alinhados com o tema da pesquisa foi conduzida através da ferramenta de pesquisa *Web of Science (Clarivate Analytics)*. Uma pesquisa do número de artigos feita em 20 de setembro de 2022, usando as palavras-chaves “torrefaction and biomass” com base no resumo, título, palavras-chave, foi contabilizado 2.849 artigos publicados. As pesquisas estão relacionadas como efeitos de torrefação nas propriedades da biomassa, biocombustíveis sólidos, densificação energética, rendimentos sólidos e energéticos, degradação térmica da biomassa através da realização de cinética de torrefação, processos termoquímicos como pirólise e gaseificação entre outros fatores correlacionados ao processo de torrefação.

O Brasil é referência mundial em reflorestamento para fins produtivos. Para atender às mais diversas necessidades de uso da madeira para fins madeireiros com na indústria moveleira e construção civil e para fins energéticos a produção de biocombustível, pellets, briquetes, carvão e lenha, o Brasil selecionou dois gêneros, *Pinus* e *Eucalyptus*, para o programa de reflorestamento energético (ZENID, 2011). O gráfico da figura 1 mostra o interesse na pesquisa da biomassa ao longo dos anos, fazendo uma pesquisa mais específica relacionando o processo de torrefação com resíduo de madeira de construção e demolição obteve-se 5 artigos, para madeira de *Pinus* 39 e madeira de *Eucalipto* 143.

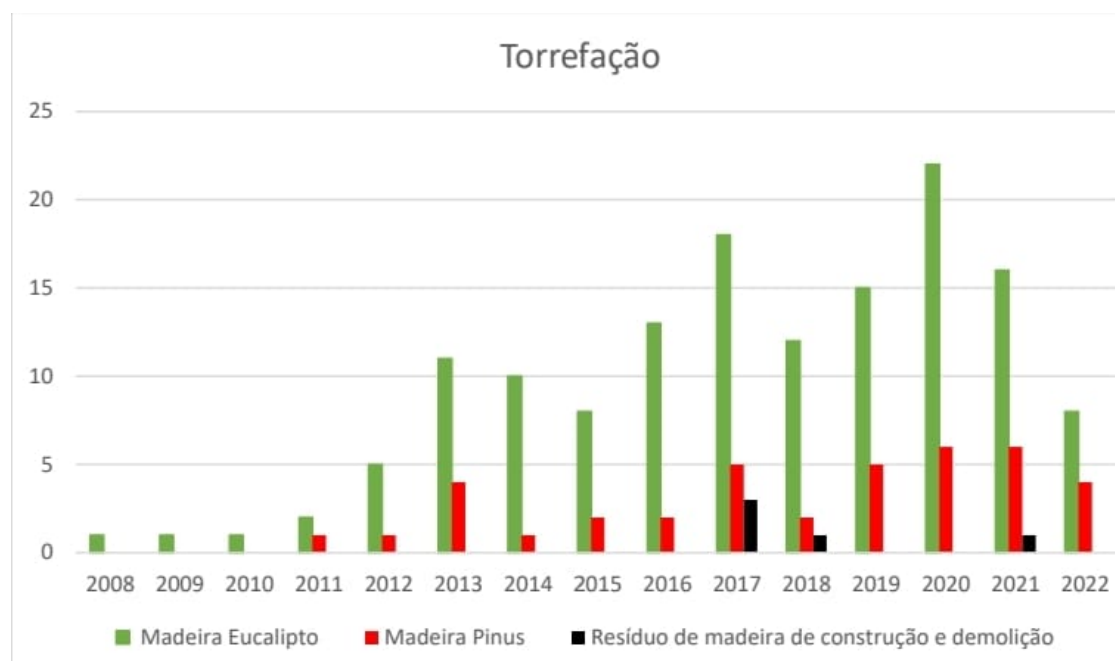


Figura 1 – Publicações o decorrer dos anos

1.5 Estrutura do Trabalho

A presente dissertação inicia-se com um enquadramento do contexto atual energético e ambiental, visando a produção e otimização de um biocombustível sólido, utilizando o processo de torrefação para melhorar as propriedades da biomassa para uso energético. Com intuito de aproveitar o resíduo e agregar valor ao produto, com possibilidade de compactação na forma de pellets ou briquetes e incrementar na comercialização no mercado de biomassa nacional e internacional. No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre o tema desenvolvido, abrangendo os assuntos relacionados a biomassa lignocelulósicas, resíduo de madeira da construção civil, processos termoquímicos com foco principal na torrefação e as metodologias estatísticas como planejamento de experimento e superfície de resposta. Em seguida, o capítulo 3 descreve a metodologia desenvolvida e normas utilizadas para obtenção da blenda otimizada. Resultados experimentais, análises estatísticas, limitações e futuras pesquisas são discutidos no capítulo 4; por fim, as conclusões estão dispostas no capítulo 5.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Contexto energético e ambiental

A segurança energética e ambiental é o principal fator que impulsiona a pesquisa por novas fontes renováveis (ZABED et al., 2017). O uso excessivo de combustíveis fósseis, como petróleo e carvão mineral, causam grandes danos ambientais no decorrer dos anos, devido às emissões de gases de efeito estufa (*green house gases* – GHG) tais como gás carbônico (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), que alteram a composição da atmosfera, fatores que afetam principalmente as mudanças climáticas. Essas mudanças têm impacto negativo no meio ambiente, na sociedade e são uma ameaça para a estabilidade econômica (CHERUBINI, 2010).

No relatório Estado do Clima Mundial, 2021, desenvolvido por especialistas da Organização Meteorológica Mundial (OMM), foi ressaltada a gravidade das mudanças climáticas no mundo. No ano de 2021 houve um novo recorde nas concentrações de gases de efeito estufa, a elevação do nível do mar e o aquecimento e acidificação dos oceanos. Neste relatório evidencia-se que o clima extremo, causado pelas mudanças climáticas, vem impactando na insegurança alimentar e na crise hídrica, levando a uma perda econômica de centenas de bilhões de dólares no último ano (ONU-BR, 2022).

Em 2021, a escassez hídrica nas regiões sudeste e sul do Brasil afetou a capacidade operativa de importantes reservatórios de usinas hidrelétricas. Simultaneamente o mundo enfrentou uma crise energética devido aos desbalanços na oferta e demanda de gás natural, combustível utilizado em larga escala pelos países do hemisfério norte. Consequentemente, a alta dos preços afetou o mercado global (EPE, 2022).

A Rússia é o terceiro maior produtor mundial de petróleo e segundo maior produtor de gás, sendo responsável por 12% e 17% da produção mundial desses energéticos, respectivamente (IEA, 2021). No ano de 2022, as sanções aplicadas à Rússia devido à invasão à Ucrânia geraram um grande desabastecimento energético nos mercados asiáticos e, ao mesmo tempo, nos mercados europeus, que foram forçados a reduzir de forma drástica e repentina a dependência do gás natural russo (IEA, 2022a).

Segundo dados da "Agência Internacional de Energia" (*International Energy Agency*, IEA), mais de 80% da matriz energética mundial é composta por fontes de combustíveis fósseis, tais como o petróleo (31,1%), carvão (27,0%) e gás natural (23,0%). Com relação às fontes renováveis, temos biomassa (9,3%), hidráulica (2,6%) e outras (2%) (IEA, 2022b).

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) feito pela Empresa de Pesquisa

Energética (EPE) com dados de 2021, a matriz energética brasileira possui mais fontes renováveis quando comparada à matriz energética mundial. Ela é composta por 33,1% de petróleo, 19,1% de derivados da cana, 12,6% hidráulica, 11,8% gás natural, 8,9% lenha e carvão vegetal, 7,7% de outras fontes renováveis, 1,3% nuclear e 0,6% de outras fontes não renováveis. (BEN, 2022).

Devido à preocupação mundial com o impacto ambiental de nossas fontes de energia, a Organização das Nações Unidas (ONU) e seus parceiros criaram a Agenda 2030 com 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Dentre as 17 ODS do contexto energético e ambiental se destaca o ODS 7, que está relacionado ao acesso à energia sustentável e acessível à população mundial e o ODS 13, medidas que devem ser tomadas com urgência para diminuir o uso de combustíveis fósseis que causam principalmente mudanças climáticas e seus efeitos.

Portanto, é necessário um progresso na transição energética em direção a uma economia de baixa emissão de carbono para diminuir a poluição ambiental. É de suma importância a redução de fontes fósseis na matriz energética mundial para assegurar a viabilidade da sobrevivência humana no planeta (ZABED et al., 2017). Todavia, o aumento de fontes renováveis de energia podem oferecer benefícios não só para o meio ambiente, mas também para a sociedade, com a melhoria da qualidade do ar, e para o setor econômico na geração de novos empregos visando o crescimento econômico, resiliência a futuras crises energéticas e mitigação do impacto de doenças pandêmicas como exemplo, COVID-19) (MAHDAVI et al., 2022).

2.2 Resíduos de madeira

Resíduo é toda sobra de um processo de produção ou exploração, de transformação ou utilização, ou seja, é tudo aquilo que ainda pode ser reciclado e reutilizado; pode-se tornar matéria-prima de um novo produto ou processo (QUIRINO, 2002)

A madeira é o material mais antigo utilizado na construção para fins estruturais e de sustentação, devido à disponibilidade na natureza, alta resistência específica, boas propriedades de isolamento térmico e diversos produtos industrializados. Em contrapartida, a madeira está sujeita à deteriorações dentre as quais se destacam a degradação biológica e ação do fogo (PFEIL, W.; PFEIL, M., 2003; TEREZO et al., 2015).

Os resíduos de madeira são gerados na indústria madeireira em forma de cascas, cepilhos e serragem. Na construção civil os resíduos surgem como entulho nos canteiros de obra e podem aparecer em forma de chapas, ripas, assoalhos e restos em madeira de demolição. Na exploração florestal os resíduos podem se apresentar em forma de galhos, tocos, serragem e cascas (QUIRINO, 2002; SILVA, L. et al., 2018). Os resíduos também

podem ser gerados em outros setores como apresentado na Figura 2.

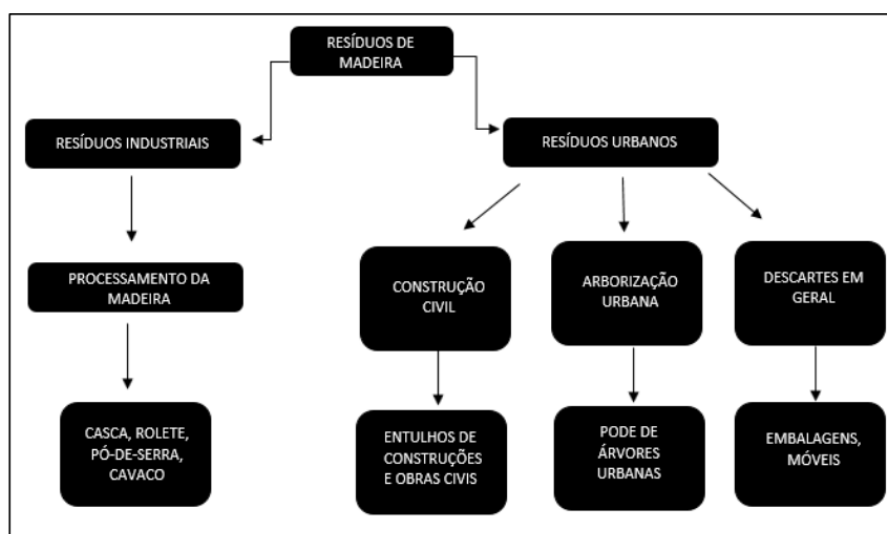


Figura 2 – Diagrama de geração de resíduos de madeira.

Fonte: CAVALCANTI e ALVES (2018)

2.3 Construção civil

A construção civil é um dos setores mais importantes para o desenvolvimento econômico e social, mas a indústria também é uma grande fonte de resíduos. O descarte dos resíduos de forma irregular causa grandes impactos ambientais, dentre eles a emissão de gases poluentes e a contaminações de solo e água. Em escala mundial, este setor consome 40% da produção total de energia, 12-16% de toda água disponível, 32% de recursos não-renováveis e renováveis, 25% de toda a madeira, 30-40% de todos os resíduos sólidos, e emite 35% de gás carbônico (SON et al., 2011; DARKO et al., 2017; ROQUE; PIERRI, 2019 apud MAESTRELLO, 2021)

No Brasil, a capital federal "é um polo atrativo de pessoas, com capacidade de crescimento demográfico anual superior à média nacional"(MANSUR, 2022b). O Distrito Federal é dividido em 33 regiões administrativas (RA_s). Está prevista para 2022 a criação de 18 novos bairros no DF, com planejamento que deve levar em conta o impacto ambiental e a qualidade de vida de toda a população (MANSUR, 2022b). O governo está ampliando a mobilidade urbana e a infraestrutura na capital federal, com a construção de 16 obras de grande porte, como o Túnel de Taguatinga, os viadutos da Estrada Setor Policial Militar (ESPM), e Estrada Parque Indústrias Gráficas (EPIG), os serviços de infraestrutura de Vicente Pires, além da reforma da W3 Sul. (MANSUR, 2022a).

Nos termos da Lei Federal nº 12.305/2010, os resíduos da construção civil (RCC) "são aqueles gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de cons-

trução civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis".

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307 de 5 de julho de 2002 é visto como o marco regulatório para o gerenciamento de resíduos, estabelecendo classificações, normas e procedimentos para a administração adequada dos resíduos (Tabela 1). Devido à necessidade de implantação de diretrizes para reduzir efetivamente o impacto dos resíduos da construção civil no meio ambiente, considera-se que o descarte em locais inadequados pode levar à deterioração da qualidade ambiental (CONAMA, 2002).

Tabela 1 – Classificação e destinação dos resíduos da construção civil

Classificação	Características	Destinação dos RCC
Classe A	São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa, concreto, peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.)	Deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.
Classe B	São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros.	Deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.

Continua na próxima página

Tabela 1 – continuação da página anterior

Classe C	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso.	Deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.
Classe D	São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminantes oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.	Deverão ser armazenados, transportados, reutilizados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas

Fonte: Conselho Nacional do Meio Ambiente, [CONAMA \(2002\)](#), pág 6

No Brasil 98% dos RCC podem ser reciclados, porém, apenas 21% é reciclado. Estima-se que 50% das obras no Brasil são irregulares, produzindo entre 60 a 70% dos resíduos da construção civil. Grande parte desse resíduo são descartado de maneira incorreta, devido à falta de fiscalização e conscientização da população ([FARIA, 2019](#)).

De acordo com o relatório publicado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais [ABRELPE \(2021\)](#), em 2020 foram gerados cerca de 47 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD), representando um crescimento de 5,5% com relação ao ano anterior, equivalente a 221,2 kg/habitante/ano no Brasil. Entretanto, há incerteza sobre o real volume dos resíduos, visto que esses são apenas os materiais coletados e um dos principais obstáculos na gestão desses resíduos é o descarte irregular, sem qualquer rastreabilidade ([ECO-RESPONSE, 2020](#)).

A composição dos resíduos de construção civil depende do tipo de obra, região, volume gerado e até mesmo época do ano ([ECO-RESPONSE, 2020](#)). Os principais materiais encontrados nos resíduos de construções e reformas são apresentados no Gráfico da Figura 3 .

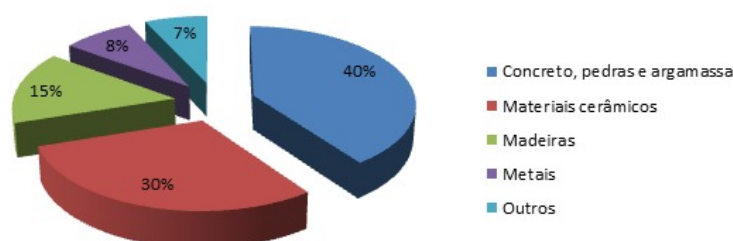


Figura 3 – Composição dos RCC.

Fonte: Adaptado [Eco-Response \(2020\)](#)

No DF, os resíduos (RCC, restos de podas urbanas e galhadas) são recolhidos pela Superintendência de Limpeza Urbana (SLU), empresas privadas e outros órgãos do Governo do Distrito Federal (GDF) e encaminhada à Unidade de Recebimento de Entulho (URE) para o fim de ciclo desses resíduos. Em 2020 a URE recebeu cerca de 5 mil toneladas diárias de resíduos da construção civil ([SLU, 2021](#), pág 41). Mais de 1,4 milhão de tonelada desses resíduos foram aterrados na URE em 2021([SLU, 2022](#), pág 57).

A reciclagem proporciona a redução dos custos envolvidos na aquisição de matérias primas e insumos, com transporte para deposição final dos resíduos, e alivia os aterros. Além dos aspectos ambientais e econômicos, a reciclagem dos RCC também oferece benefícios sociais, uma vez que possibilita a formação de nova cadeia de trabalho, gerando emprego, renda e qualificação de uma população excluída do mercado formal de trabalho. Temos também a melhoria do ambiente urbano (uma vez que se reduz a deposição irregular dos RCC), na saúde coletiva e a possibilidade de utilização de artefatos advindos da reciclagem dos RCC na construção de obras de interesse social, benfeitorias, e manutenção do equipamento urbano ([PASCHOALIN, 2017](#)).

Na Figura 4 são apresentados os agregados da construção civil, materiais produzidos por meio da reciclagem dos RCC, que apresentam características técnicas para uso na construção, em obras de edificação, de infra-estrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia ([CONAMA, 2002](#)).



Figura 4 – Agregados da construção civil

Fonte: © 2020 Locações Martins

2.3.1 Resíduo de madeira na construção civil

A madeira é utilizada na construção civil de várias maneiras, podendo ser de forma temporária, ou empregada nas áreas estruturais e internas, entre outras diversas aplicações. O resíduo é classificado na Classe B e tem a possibilidade de ser comercializado com empresas, cooperativas ou associações de coleta seletiva que reciclam estes resíduos (ZENID, 2011; SILVA, G. S. da et al., 2016; MAESTRELLO, 2021).

A madeira de RCC contém entre 1 a 2% em peso de materiais não lenhosos (EDO et al., 2017). Quando ocorre a combustão desses resíduos, os contaminantes apresentados no gráfico da Figura 5 contribuem para o aumento dos resíduos minerais (cinzas).

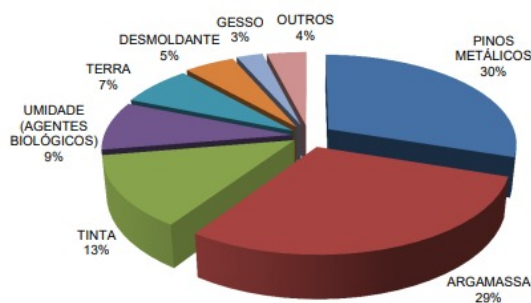


Figura 5 – Incidência dos contaminantes nos resíduos de madeira de construção

Fonte: Lopes, Pereira e Hamaya (2013)

Apesar de ser um material sustentável que pode ser utilizado para fins energéticos, os resíduos de madeira de construção ainda são negligenciados, com os descartes irregulares e o aterramento, contribuindo para a poluição do meio ambiente. O aproveitamento desse resíduo é um processo importante para a sustentabilidade e redução do impacto ambiental do descarte desses resíduos (SILVA, G. S. da et al., 2016; MAESTRELLO, 2021).

2.4 Biomassa

A biomassa é um recurso energético abundante que cobre grande parte das áreas terrestres e tem um ciclo de vida curto (CHEN; LIN, B.-J. et al., 2021). É todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica de origem animal ou vegetal, e seus derivados, podendo ser utilizado na produção de biocombustível e na conversão em energia (YOKOYAMA; MATSUMURA, 2008).

De acordo com Palanivelu, Ramachandran, Raghavan et al. (2021), a biomassa pode ter as seguintes origens: plantações florestais, resíduos de processamento de madeira e resíduos de extração de madeira, resíduos agrícolas, resíduos agroindustriais, resíduos animais, resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos, resíduos oriundos do processamento de alimentos e esgoto.

O potencial energético dos resíduos depende da matéria-prima e o processo termoquímico utilizado. Para uso energético o resíduo pode ser usado na combustão direta para geração de calor e conversão em energia sustentável (SHALINI et al., 2020; SILVA et al., 2021; WIJITKOSUM, 2022).

2.4.1 Biomassa lignocelulósica

A biomassa lignocelulósica é um recurso abundante e renovável de plantas compostas principalmente por polissacarídeos (celulose e hemiceluloses) e um polímero aromático (lignina), podendo apresentar outros componentes químicos, como: amidos, proteínas, ácidos, sais minerais entre outros. Em termos energéticos, é toda e qualquer forma de energia associada a formas de energia química acumulada mediante processos fotossintéticos (OMACHI et al., 2004; ZOGHLAMI; PAËS, 2019).

O Brasil possui grande biodiversidade de biomassas lignocelulósicas com potencial para o aproveitamento energético e químico em massa, a exemplo dos resíduos de serraria, culturas energéticas, plantas aquáticas, resíduos florestais e agrícolas, entre outros (MACÊDO, 2012; ZABED et al., 2017).

O uso dos resíduos lignocelulósicos para fins energéticos contribui para a redução da emissão dos gases de efeito estufa. Durante a combustão há a emissão de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, entretanto, o balanço de emissões é nulo ou até mesmo

negativo no ponto de vista das mudanças climáticas, visto que durante o crescimento da vegetação o CO_2 é absorvido durante a fotossíntese, ou seja, a absorção desse gás é equivalente à emissão durante a queima (TIMMONS; VITERI, 2010; BRASIL et al., 2021).

2.4.1.1 Composição elementar e bioquímica

Os elementos principais existentes na estrutura molecular da biomassa são carbono (C), oxigênio (O), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S). O carbono é o principal componente que contribui para conversão em energia durante a combustão. Entre todos os combustíveis de hidrocarbonetos, a biomassa é a que possui o maior teor de oxigênio. Isto é ruim, tendo em vista que o oxigênio reduz o poder calorífico, dificulta a transformação da biomassa em combustíveis líquidos e favorece a formação de CO_2 (BASU, 2013; CHEN; PENG; BI, 2015).

Os componentes orgânicos predominantes em sua composição são a celulose, a hemicelulose e a lignina. Além disso, apresentam pequenas quantidades (0,2 a 1%) de sais minerais, visto que esses minerais produzem cinzas quando a biomassa é queimada. (PFEIL, W.; PFEIL, M., 2003).

- Celulose: representa cerca de 40-60% (base seca), formando os filamentos que reforçam as paredes das fibras longitudinais (PFEIL, W.; PFEIL, M., 2003; WANG et al., 2017). Sendo um polissacarídeo formado por moléculas de glicose ligadas por ligações β -1,4-glicosídicas, pode estabelecer ligações intra e intermoleculares com o hidrogênio, possuindo uma estrutura cristalina (WYMAN et al., 2005; NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014).
- Hemicelulose: é um polissacarídeo quimicamente heterogêneo ramificado, formado principalmente por pentoses (xilose e arabinose), hexoses (manose, glicose e galactose) e ácidos urônicos, representando entre 15–30% (base seca) da biomassa (WYMAN et al., 2005; WANG et al., 2017). Tem a função de conectar as fibras de lignina e celulose (BASU, 2013).
- Lignina: é composta por uma rede polimérica tridimensional formada por unidades de fenilpropano interligada que possuem alto teor de carbono, sendo o carbono relacionado com o conteúdo de energia (WYMAN et al., 2005), representando entre 10–25% (base seca) da biomassa (WANG et al., 2017). Proporciona rigidez à estrutura, mantém unidas as fibras de celulose e hemicelulose e confere sustentação, resistência e impermeabilidade à planta (GALLETTI; ANTONETTI, 2013 apud MAMVURA; DANHA, 2020).

A decomposição térmica dos principais componentes orgânicos ocorre nas seguintes faixas de temperatura: 220 a 315 ° C (hemicelulose), 315 a 400 ° C (celulose) e 160 ° C

a 900 ° C (lignina) (CHEN; PENG; BI, 2015). As propriedades dos polissacarídeos e do polímero aromático estão resumidas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades da celulose, hemicelulose e lignina na biomassa

	Celulose	Hemicelulose	Lignina
Estrutura	Linear	Ramificada	Tridimensionais
Fórmula	$(C_6H_{10}O_5)_m^a$	$(C_5H_8O_4)_m$	$[C_9H_{10}O_3(OCH_3)_{0,9-7}]_m$
Razão atômica O/C	0,83	0,80	0,47 – 0,36
Razão atômica H/C	1,67	1,60	1,19 – 1,53
TDT ^b (°C)	315 – 400	220 – 315	160 - 900
Componente	Glicose	Xilose, glicose, manose, galactose, arabinose e ácido glucurônico	Fenilpropopano
Comportamento térmico	Endotérmico (exotérmico se a formação carvão for significativa)	Exotérmica	Exotérmica

^a*m*: grau de polimerização.

^b*TDT*: temperatura de decomposição térmica.

Fonte: CHEN, PENG e BI (2015) adaptado.

2.4.1.2 Propriedades energéticas

A caracterização energética é necessária para fornecer informações do biocombustível sólido e avaliar se a biomassa tem potencial energético ao comparar com as propriedades do carvão mineral (MAMVURA; DANHA, 2020). A composição da biomassa in natura influencia muito no desempenho de um sistema de conversão. Sendo assim, as análises químicas imediatas, elementares e de poder calorífico ajudam na escolha da rota tecnológica mais adequada e com maior taxa de eficiência para uso energético (BRASIL et al., 2021; MACÊDO, 2012).

A análise química imediata fornece os teores de cinza, materiais voláteis e carbono fixo. Segundo Chaves (2020) são parâmetros importantes que trazem informações relevantes para estimar o perfil de combustão dos combustíveis, e a partir desses dados é possível estimar outras informações, como exemplo o rendimento gravimétrico durante os processos termoquímicos.

- Os materiais voláteis são biocombustíveis gasosos compostos por hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarbonetos leves que são liberados quando os principais componentes da biomassa sofrem a decomposição térmica.

Os materiais voláteis possuem uma fase condensável e gases permanentes. Sua proporção e composição dependem principalmente da natureza da matéria-prima (fonte de biomassa) e das condições de reação (temperatura e tempo de residência) (PEÉREZ et al., 2015; BRASIL et al., 2021).

- O carbono fixo é um biocombustível sólido, sendo ele um carvão volátil que representa o percentual de carbono contido na biomassa (GOMES; OLIVEIRA, 1980). Quanto maior o carbono fixo maior o poder calorífico (CHEN; PENG; BI, 2015).
- A cinza é o resíduo mineral, formada por compostos inorgânicos como carbonatos, fosfatos, sulfatos de sílica, cálcio, magnésio, sódio e potássio, obtidos pela combustão completa da biomassa (SILVEIRA, E., 2018).

A análise elementar determina as proporções em porcentagens dos principais elementos (carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio) presentes na biomassa. O poder calorífico superior (PCS) é a quantidade de calor gerada pela combustão completa da amostra sob certas condições (KENNEY; SENNERBY-FORSSE; LAYTON, 1990).

O teor de cinzas é inversamente proporcional ao poder calorífico. Dependendo da magnitude do teor de cinzas, a energia química disponível na biomassa é reduzida proporcionalmente. Dessa forma, simultaneamente, onde a demanda por conversão da biomassa em energia aumenta, também aumenta os resíduos minerais produzidos por esse processo de combustão, gerando um grande desafio em relação à eficiência e gestão desses subprodutos, o que pode levar a sérios problemas operacionais, como a redução da taxa de transferência de calor nas caldeiras, resultando em altos custos operacionais nas usinas termelétricas (HENNE, 2018; BRASIL et al., 2021; BACKES et al., 2022).

2.4.1.3 Limitações para uso energético.

As propriedades da biomassa lignocelulósica influenciam as características do produto de um processo térmico, e sua natureza é limitada para conversão em biocombustível. As principais barreiras para tal mudança são inerentes à própria biomassa, pois algumas de suas propriedades são indesejadas para aplicações energéticas, como sua natureza higroscópica, alto teor de umidade, baixo poder calorífico e sua heterogeneidade. Outras desvantagens da biomassa são sua estrutura tenaz, fibrosa e a baixa densidade (PEÉREZ et al., 2015; CHEN; PENG; BI, 2015).

A natureza higroscópica com alta umidade é a principal característica da biomassa lignocelulósica. O teor de umidade é definido como a massa de água contida na biomassa e pode ser expresso tanto na base úmida quanto na base seca. A umidade permanece na biomassa sob duas formas: livre (extrínseca) e inerente (intrínseca). A umidade intrínseca

é relacionada à sua composição e a umidade extrínseca é influenciada por condições climáticas (STREZOV; EVANS, 2015).

A umidade drena grande parte do potencial energético de uma planta de gaseificação durante a conversão, e a energia utilizada na evaporação não é recuperada (BASU, 2013). Além disso, diminui a temperatura da chama e a eficiência da caldeira, retardando o processo de combustão e diminuindo a temperatura do forno, resultando em maior uso de combustível, maior tempo de cozimento e emissões mais altas. (ORANG; TRAN, 2015).

A baixa densidade da biomassa causa problemas relacionados à logística (armazenamento, transporte e manuseio), e também diminui a densidade de energia (NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014). Segundo Chaves (2020) a densidade energética é definida pela quantidade de energia térmica contida por unidade de volume, informação essencial para avaliar os custos e a viabilidade do armazenamento e do transporte de um combustível.

A biomassa in natura possui uma densidade energética relativamente baixa quando comparada a carvão mineral, dificultando o processo de moagem devido à sua natureza fibrosa (SADDAWI et al., 2012). Além disso, a proporção da biomassa deve ser relativamente maior para substituir uma quantidade menor de carvão em aplicações como combustão e gaseificação (PRINS; PTASINSKI; JANSSEN, 2006).

2.5 Conversão termoquímica

Os processos termoquímicos de conversão da biomassa podem envolver processos de absorção (endotérmicos) e liberação (exotérmicos) de calor. A transformação da biomassa pode se dar na presença ou não de oxigênio. Durante o processo, os hidrocarbonetos presentes na madeira, principalmente os componentes orgânicos predominantes (celulose, hemicelulose e lignina), sofrem reações de decomposição térmica, gerando os produtos que podem ser gasosos, líquidos ou sólidos (BRASIL et al., 2021; KLAFKE, 2018).

Os rendimentos dos produtos sólido, líquido e gasoso obtidos pela conversão termoquímica são amplamente afetados por parâmetros do processo, como temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência, tamanho de partícula da matéria-prima, biomassa e reator (NANDA et al., 2016; NANDHINI et al., 2022).

A produção dos produtos gera através das transformações físico-químicas que a madeira sofre na presença de calor, de forma que, em altas temperaturas, o material sofre despolimerização, combustão e carbonização (KLAFKE, 2018). O produto sólido pode ser carvão vegetal, coque e biocarvão, que possuem propriedades semelhantes às do carvão

mineral (NANDHINI et al., 2022), os líquidos em bio-óleos e hidrocarbonetos e os gasosos em gás de síntese, hidrogênio, metano, entre outros (OKOLIE et al., 2021).

A conversão de biomassa pode ser tipicamente categorizada em rotas termoquímicas com processo de torrefação, pirólise, gaseificação e processo hidrotérmico. O esquema apresentado na Figura 6 descreve uma visão geral das conversões termoquímicas e as suas classificações.

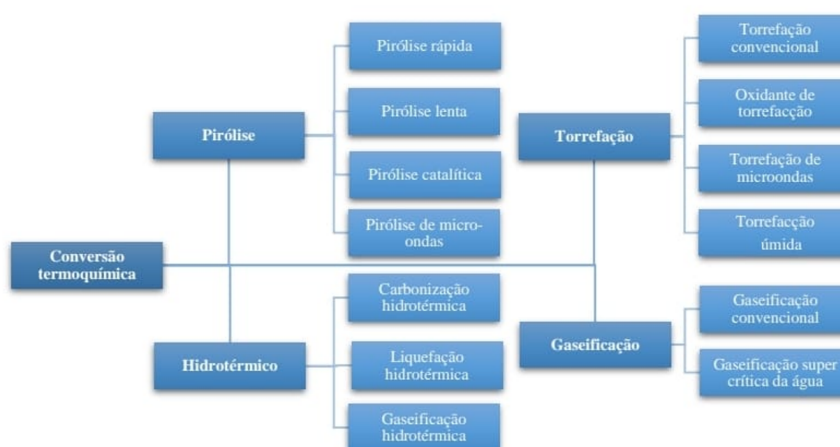


Figura 6 – Esquema do processo termoquímico e das suas classificações

Fonte: Adaptado Das et al. (2021)

A torrefação é a primeira etapa que ocorre entre as conversões termoquímicas. O produto sólido é o biocombustível principal desse processo. Pode ser classificada como convencional, de micro-ondas, úmida e de torrefação oxidativa. Algumas das principais vantagens do processo de torrefação são a maior confiabilidade e estabilidade com facilidade de controle. Entretanto, o maior custo operacional e tempo de residência são as limitações do processo (DAS et al., 2021).

A pirólise é realizada em temperaturas entre 400 °C e 800 °C. Os biocombustíveis líquidos (bio-óleos) são os principais produtos da pirólise e liquefação. Na pirólise e liquefação, as reações químicas são desencadeadas em um ambiente inerte ou livre de oxigênio (CHEN; LIN, B.-J. et al., 2021). O processo de pirólise rápida é mais vantajoso para armazenamento e transporte de combustíveis líquidos em comparação com outros processos. Contudo, a pirólise por micro-ondas representa a maior eficiência energética devido ao seu menor consumo de energia e à menor produção de cinzas. O processo de pirólise lenta requer um maior consumo de energia devido à menor taxa de aquecimento com tempo de residência elevado, sendo uma desvantagem para o processo.(CHEN; PENG; BI, 2015; DAS et al., 2021).

A temperatura de gaseificação é entre 600°C e 1300 °C (CHEN; LIN, B.-J. et al., 2021). A gaseificação pode ser classificada em convencional, vapor e gaseificação

supercrítica de água, dependendo do ambiente de reação (DAS et al., 2021). Os principais gases obtidos são hidrogênio (H_2) e monóxido de carbono (CO), e ambos são chamados de gás de síntese. Durante o processo, são liberados gases como dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), bem como poluentes como H_2S , COS , CS_2 , NH_3 e HCN (CHEN; LIN, B.-J. et al., 2021). Segundo Das et al. (2021), a gaseificação (supercrítica) é uma rota promissora para a produção de hidrogênio, porém é necessária uma otimização adicional do processo para aumentar a produção do combustível.

2.6 Torrefação

A torrefação é um processo de tratamento térmico que ocorre no intervalo de temperatura entre 200 e 300 ° C com duração de 40 a 60 minutos, sob uma atmosfera inerte com ausência parcial ou completa de agentes oxidantes (CHEN; PENG; BI, 2015; SARKER et al., 2021). O comportamento exotérmico pode ser observado durante a degradação térmica das hemiceluloses e lignina, enquanto a endotermicidade é observada durante a degradação térmica da celulose (CHEN; KUO et al., 2014).

O objetivo principal da torrefação é o aprimoramento e a produção de biocombustível sólido como alternativa para substituição parcial ou completa do carvão mineral (CHEN; LIN, B.-J. et al., 2021). Os benefícios obtidos pela torrefação incluem maior poder calorífico ou densidade de energia, menores relações atômicas O/C e H/C e teor de umidade, maior hidrofobicidade ou resistividade à água, melhor capacidade de moagem e reatividade e propriedades mais uniformes da biomassa (CHEN; PENG; BI, 2015), quebrando as principais barreiras da biomassa in natura para uso energético.

2.6.1 Processo de torrefação

O processo de torrefação é dividido em cinco etapas, conforme pode ser visto na Figura 7. Durante todo processo é possível analisar a demanda de energia que nos permite fazer um balanço térmico do sistema (BERGMAN et al., 2005; SILVEIRA, E. A., 2020).

1. : Na etapa inicial de aquecimento, o processo se inicia com uma temperatura ambiente de 25 ° C e eleva a temperatura aquecendo a biomassa até 100 ° C.
2. Nesta etapa ocorre a pré-secagem, mantendo a temperatura de 100 ° C constante por cerca de 30 minutos. A biomassa começa a perder massa, devido à eliminação da umidade intrínseca, ou seja, a água fisicamente ligada é removida enquanto a resistência contra a transferência de massa e calor está nas partículas de biomassa.
3. A secagem ocorre até que a taxa de evaporação da água comece a diminuir ao atingir o teor crítico de umidade. A biomassa está quase livre de conteúdo de água no

final desta etapa. Nesta etapa ocorre o aquecimento intermediário até atingir a temperatura de torrefação.

4. Início o processo de torrefação (200 – 300 ° C), com uma temperatura constante e com tempo de residência definido. A desvolatilização começa durante o período de aquecimento, continua durante o período de temperatura constante e para durante ou após o período de resfriamento. Nesta etapa ocorre maior perda de massa, e é possível visualizar o perfil do rendimento mássico (rendimento gravimétrico).
5. Na etapa de resfriamento, a temperatura do produto torrado é resfriada até a temperatura ambiente. Não há perda de massa durante este período, embora possa ocorrer alguma evaporação dos produtos da reação adsorvidos.

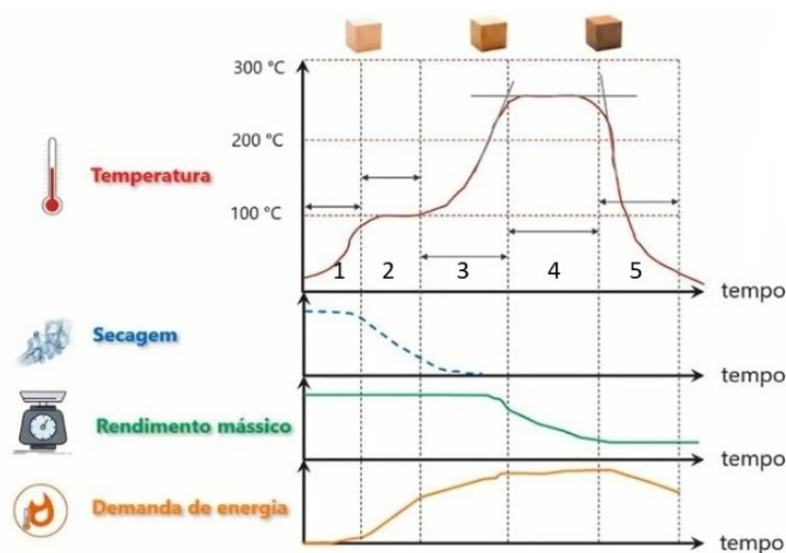


Figura 7 – Evolução dos parâmetros temperatura, umidade, massa e energia térmica demandada em função das diferentes etapas da torrefação

Fonte: Adaptado (BERGMAN et al., 2005 apud SILVEIRA, E. A., 2020)

A torrefação quebra as ligações de hidrogênio de cadeia longa na celulose, decompõe as hemiceluloses e despolimeriza a lignina na biomassa lignocelulósica, resultando em sua conversão eficiente e atualização para biocombustíveis sólidos (SARKER et al., 2021). Reduz significativamente o teor de oxigênio e hidrogênio da biomassa, aumentando assim o teor de carbono, responsável por aumentar o poder calorífico da biomassa torrada (KANWAL et al., 2019).

A Tabela 3 apresenta a transformação físico-química e as propriedades do produto final. Quando a biomassa sofre torrefação, as propriedades físico-químicas aprimoradas tornam o biocarvão produzido mais apropriado para a conversão de energia, melhorando-o como combustível alternativo ao carvão (CHEN; LIN, B.-J. et al., 2021).

Tabela 3 – Transformação físico-química e variações de propriedades da biomassa antes e depois da torrefação

Biomassa bruta	Transformações físico-químicas	Propriedade de biomassa torrificada
Alto teor de umidade	Desidratação	Baixo teor de umidade
Higroscópico	Desidratação, desidroxilação, decomposição de celulose amorfa e alcatrão polar nos poros	Hidrofóbico
Maior relação O/C e H/C	Descarbonização em menor grau, desidrogenação, desoxigenação, desacetilação, desmetoxilação e desvolatilização	Relação O/C e H/C mais baixa
Menor valor calórico	Desidratação, carbonização, desidrogenação, desoxigenação e desidroxilação	Maior valor calórico
Baixa moagem	Decomposição de hemiceluloses	Capacidade de moagem melhorada
Maior biodegradação e baixa capacidade de armazenamento	Decomposição de hemiceluloses, modificação da lignina	Menor biodegradação e maior armazenamento

Fonte :Adaptado [Chen, Bo-Jhih Lin et al. \(2021\)](#)

O rendimento de gravimétrico é menor que o rendimento de energético pois os compostos mais voláteis, sendo cerca de 30% da massa, são perdidos como gases de torrefação (gases voláteis e permanentes), principalmente devido à degradação da hemicelulose ([MAMVURA; DANHA, 2020](#)). O processo de torrefação apresenta um rendimento gravimétrico médio de 75%, com 55 a 60% de carbono, 5 a 5,5% de hidrogênio, 0,1 a 0,2% de nitrogênio e 35 a 38% de oxigênio na composição elementar. A madeira

torrificada retém 70% a 90% do conteúdo energético inicial, diminui de 80% para 60-75% seu teor de matérias voláteis e de 10% para 0-3% seu teor de umidade (PRINS; PTASINSKI; JANSSEN, 2006 apud ROUSSET; RODRIGUES, 2009).

2.6.2 Subprodutos da Torrefação

Durante a torrefação vários produtos são resultantes da degradação dos compostos da madeira são formados. A proporção de cada um está correlacionada às condições de operação (temperatura e tempo) assim como às propriedades da biomassa (ROUSSET; RODRIGUES, 2009).

O principal produto da torrefação é a biomassa torreficada (biocarvão), no entanto, uma pequena porção de alcatrão (produtos líquidos) pode ser formada, que pode variar entre 10% em peso e 40% em peso, dependendo da gravidade da torrefação e do tipo de matéria-prima (CHEN; PENG; BI, 2015). Outros subprodutos são produzidos, como o H_2 , CO_2 , tolueno e benzeno (forma gasosa), H_2O , ácidos acéticos, álcoois, aldeídos e cetonas (forma líquida) e cinzas (forma sólida) (MAMVURA; DANHA, 2020).

A biomassa torrificada tem utilidade potencial em aplicações industriais, que incluem co-queima em usinas de energia a carvão, em fornos, queimadores ou fornalhas, bem como pirólise e gaseificação para produzir combustíveis líquidos e gasosos. A torrefação aumenta significativamente a eficiência da gaseificação, melhora as propriedades de fluxo da biomassa e produz gás de síntese de alta qualidade, superior à da biomassa bruta. (SARKER et al., 2021).

O processo de torrefação aumenta o teor de cinzas nos produtos finais, limitando as aplicações de combustão e gaseificação da biomassa torrada. Isso decorre do fato de que os problemas relacionados às cinzas, como escória induzida por álcalis e por fusão de silicato e corrosão serão encontrados (CHEN; LIN, B.-J. et al., 2021). O alcatrão pode criar problemas de entupimento nas tubulações após a condensação e acúmulo. A formação de alcatrão pode ser reduzida pela aplicação de catalisadores adequados, pela otimização das condições de reação, gaseificação em loop químico, distribuição uniforme de calor e limpeza frequente do reator e acessórios com solventes (FAN et al., 2020).

2.7 Otimização do Processo de Torrefação

Para a otimização de processos, um bom desempenho operacional e redução de custos, tempo e matéria-prima, necessita-se de um bom planejamento de experimentos, utilizando a metodologia de superfície de resposta, uma técnica sequencial eficiente para o desenvolvimento de processos (MONTGOMERY; RUNGER, 2021). A atividade mais importante em estatística não é a análise de dados, mas a concepção da experiência da qual

os dados devem ser obtidos (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010). Para Neto, Scarminio e Bruns (2010), um bom planejamento significa conceber uma experiência de tal forma que forneça exatamente a informação procurada.

2.7.1 Planejamento de experimentos

O planejamento experimental (DOE, do inglês *design of experiments*) é uma ferramenta de engenharia importante para a melhoria de um processo de fabricação, tendo a randomização como princípio básico para estabelecer as relações de causa e efeito (MONTGOMERY; RUNGER, 2021). Uma coleção de técnicas matemáticas é aplicada à modelagem estatística e análise sistemática de um problema em que as respostas desejadas ou medidas de saída são otimizadas por variáveis de entrada ou fatores (TSIMPLIARAKI et al., 2009).

O principal objetivo é caracterizar a relação entre uma ou mais variáveis resposta e um conjunto de fatores que estão sendo analisados durante o processo, para a projeção um modelo que descreva a variável resposta em função dos intervalos estudados desses fatores. Então, por meio da metodologia de resposta de superfície, é possível aproximar um modelo empírico a uma relação entre os fatores e a resposta do processo. Essa função que relaciona entre os fatores de entrada controláveis e não controláveis é chamada de superfície de resposta (MENDONÇA, 2012).

De acordo com Montgomery e Runger (2021), um experimento planejado é um teste, ou série de testes, em que são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um processo, com finalidade de observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída. O planejamento do experimento é dado por 7 etapas:

1. Reconhecimento e relato do problema
2. Escolha dos fatores e dos níveis
3. Seleção da variável resposta
4. Escolha do planejamento experimental
5. Realização dos dados
6. Análise dos dados
7. Conclusões e recomendações

Como mostrado na Figura 8, um processo pode ser pensado como uma combinação de máquinas, métodos e operadores que transformam uma matéria-prima (entrada), submetido alguns fatores de entrada para obter um produto (saída), permitindo aos

analistas controlar os fatores considerados importantes para caracterizar ou explicar a variável de resposta do experimento. (ANDERSON-COOK; BORROR; MONTGOMERY, 2009)

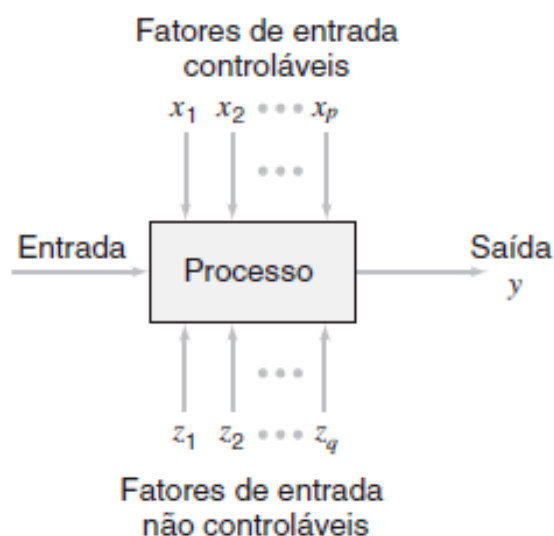


Figura 8 – Modelo geral de um processo

Fonte: Montgomery e Runger (2021)

2.7.2 Metodologia de superfície de resposta

A metodologia de superfície de resposta (RSM, do inglês *Response Surface Methodology*) uma técnica de otimização baseada em planejamentos fatoriais desenvolvida por Box e Wilson em 1951. Baseada em um conjunto de métodos matemáticos e estatísticos voltadas para o estudo empírico das relações entre fatores controláveis e não controláveis, em que pode ser aplicada para qualquer número de fatores. A RSM é representada por um gráfico 3D, esboçando os contornos da superfície de resposta (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010; MONTGOMERY; RUNGER, 2021).

A RSM possui duas etapas: a modelagem e o deslocamento. A modelagem é realizada em modelos lineares ou quadráticos e as respostas são obtidas com o planejamento fatorial. O deslocamento ocorre ao longo do caminho de máxima inclinação para um determinado modelo, sendo a trajetória onde a resposta mais varia (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001, pág 251). Na RSM o número de fatores não é uma restrição, nem o número de respostas, portanto, pode ser aplicada a qualquer número de fatores, assim como pode modelar várias respostas ao mesmo tempo (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001, pág 266).

"[...]A qualidade das estimativas dos parâmetros depende, principalmente, do método de estimação utilizado (método dos mínimos quadrados ou métodos da máxima verossimilhança) e da utilização de planos adequados para a coleta de dados. Esses planos são denominados delineamentos para superfície de resposta. Dentre os delineamentos mais econômicos,

destacam-se os compostos centrais(CDD). Entretanto, sabe-se que esses delineamentos são eficientes em experimentos realizados em laboratório, onde normalmente os erros experimentais são menores e suas condições são mais facilmente controláveis."(MENDONÇA, 2012)

Em estatística, o delineamento composto central (CCD do inglês *Central Composite Designs*) é um desenho experimental para construir um modelo de segunda ordem (quadrático) utilizando o RSM. Este projeto foi introduzido por Box e Wilson (1951), no estudo de superfícies de respostas, como uma evolução do planejamento 3^k (k = número de fatores) (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001; MENDONÇA, 2012). De acordo com Neto, Scarminio e Bruns (2010) o CCD para k fatores, devidamente codificados como (x_1, \dots, x_k) , é formado de três partes:

- Uma parte chamada fatorial(ou cúbica), contendo um total de n_{fat} pontos de coordenadas $x_i = -1$ ou $x_i = +1$, para todos os $i = 1, 2, \dots, k$;
- Uma parte axial (ou em estrela), formada por $n_{ax} = 2k$ pontos com todas as coordenadas nulas, exceto uma, que é igual a um certo valor α (ou $-\alpha$);
- Um total de n_{centr} ensaios realizados no ponto central, onde, é claro, $x_1 \dots x_k = 0$.

Para realizar um delineamento composto central, e necessário definir como será cada uma dessas três partes. O caso de três fatores é mostrado na Figura 9, observe-se que as bolas cinzas são a parte cúbica os ensaios de um fatorial 2^3 , as bolas pretas representam a parte em estrela e a brancas o ponto central.

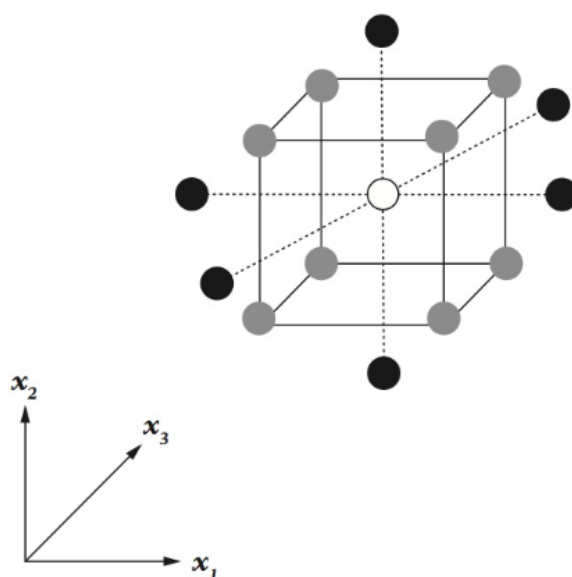


Figura 9 – Planejamento composto central para três fatores.

Fonte: Montgomery e Runger (2021)

A partir deste delineamento, pode-se observar a influência das variáveis independentes pela avaliação dos efeitos, do erro padrão e da significância estatística (p-valor). O "p-valor" está relacionado ao nível de significância da variável independente com relação à variável dependente. Um nível de confiança de 95%, ou seja, um "p-valor" inferior a 0,05 indicam que a variável analisada é significativa estatisticamente. Com uma Análise de Variância (ANOVA), utilizando o teste "F-valor" pode-se avaliar a significância da regressão e da falta de ajuste com nível de confiança de 95%, portanto, pode-se dizer se o modelo é ou não preditivo. (SANTOS, 2014).

3 Material e métodos

Este capítulo apresentará em detalhes todo o processo experimental do projeto, conforme mostrado na Figura 10. Todos os procedimentos experimentais e preparo das amostras foram realizados no Laboratório de Produtos Florestais - LPF Brasília/DF, exceto a análise elementar.

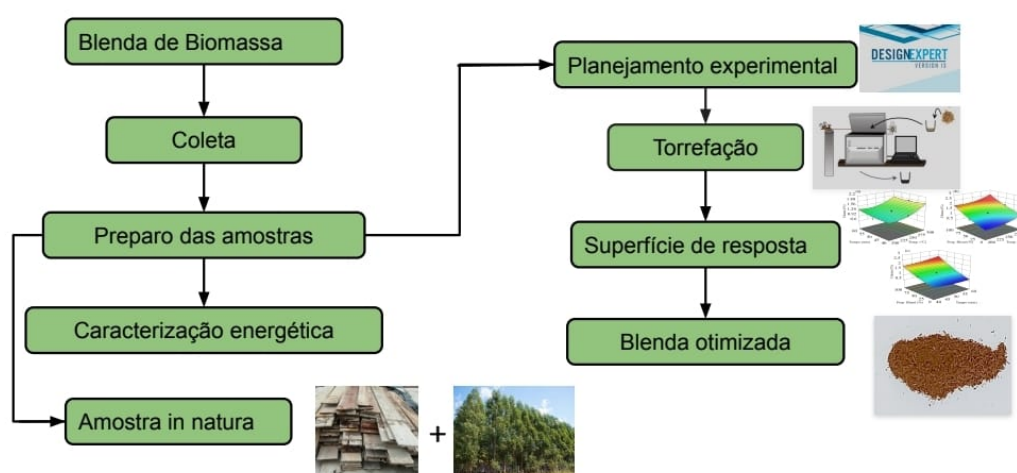


Figura 10 – Sistema da metodologia adotada no trabalho

3.1 Preparação das amostras

• Madeira Pinus de RCC

Foram selecionadas e coletadas tábuas de madeira Pinus, resíduos do material utilizado em obras da construtora Tejo Engenharia localizada em Brasília (DF).

Para análise do material “in natura” foram removidos manualmente todos os pregos das tábuas, que em seguida foram serrada em pedaços com até 5 cm de largura. Esses pedaços foram moídos no moinho de martelo e depositados em um saco plástico. Para a realização da análise e obtenção de uma amostra mais homogênea, o resíduo foi coletado em pontos diferentes, na parte inferior, central e superficial do pacote, e posteriormente colocado no moinho de facas do tipo Willey e submetido a peneiração em uma peneira com granulometria de 60 mesh (0,25 mm), seguindo a norma ISO 18123:2015. As etapas do preparo do material são apresentadas na Figura 11.

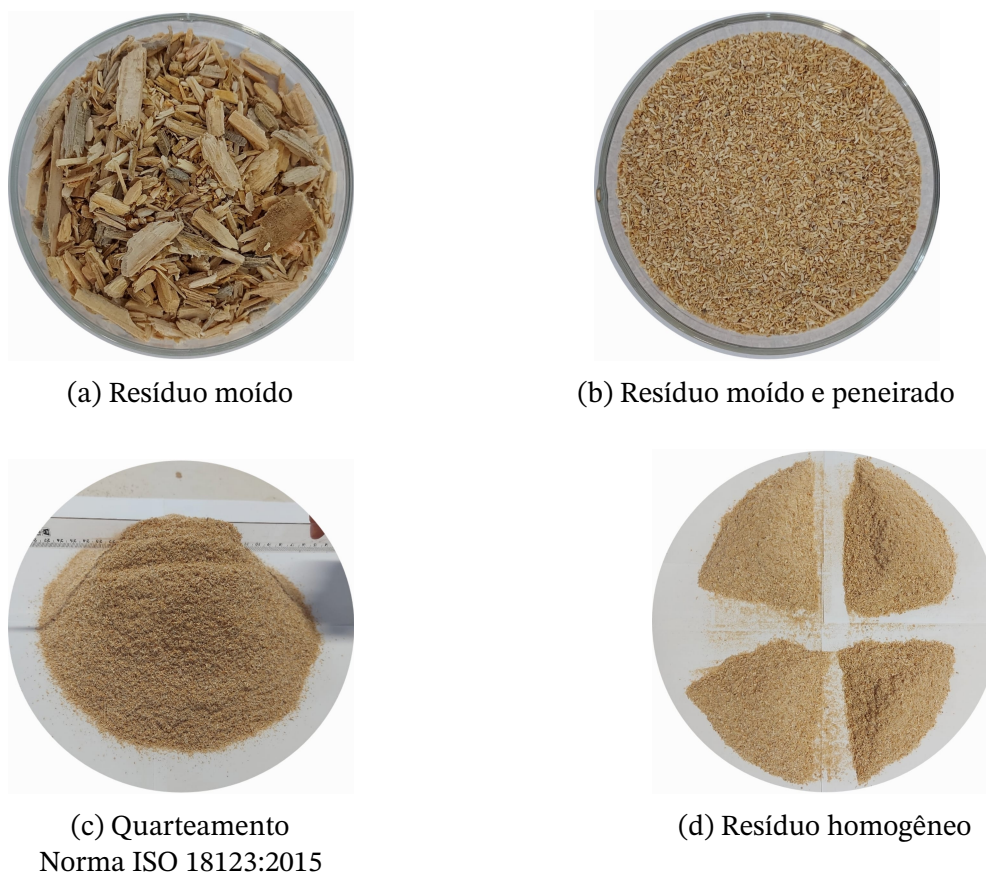


Figura 11 – Preparo da amostra dos resíduos de madeira da construção civil

- **Cavacos de *Eucalyptus Sp.***

Foi selecionada uma amostra do cavaco de *Eucalyptus Sp.* proveniente do Laboratório de Produtos Florestais (LPF), localizado em Brasília/DF. Para análise do material “in natura” a amostra foi transformada em serragem utilizando um moinho de facas do tipo Willey e submetida a peneiração para seleção da fração retida na peneira com malha de 60 mesh (0,25mm).



Figura 12 – Preparo do material cavaco de *Eucalyptus Sp.*

3.2 Caracterização química da biomassa “in natura”

3.2.1 Análise química imediata

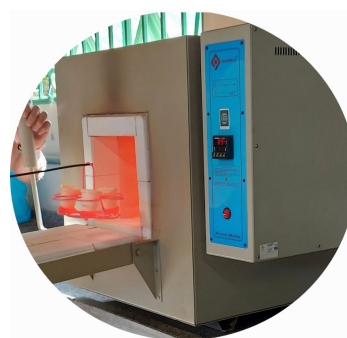
Para a realização da análise química imediata (materiais voláteis, cinzas e carbono fixo), utilizaram-se as normas ISO 18123:2015, ISO 18122:2015 e ISO 18134-3:2015 com algumas adaptações e uso de cadinhos de cerâmica.

- **Teor de materiais voláteis**

O teor de matérias voláteis (M_V) foi mensurado em base seca conforme a norma ISO 18123 (2015). As análises foram realizadas em duplicatas para cavaco de *Eucalyptus Sp.* e triplicatas para madeira de RCC. As amostras com aproximadamente 1g passaram pelo processo de secagem para retirada de toda umidade extrínseca em uma estufa com temperatura de $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 2h. O material foi retirado da estufa e inserido em dessecador por cerca de 15 minutos para resfriamento. Uma vez resfriado, mediram-se as massas dos cadinhos de porcelana e das amostras. Com os cadinhos tampados a biomassa foi inserida em um forno mufla a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 7 minutos. Depois desse procedimento, as amostras foram retiradas e inseridas em dessecador por cerca de 30 minutos para resfriamento e, por fim, mediu-se a massa final de cada uma (massa do cadinho + massa da amostra). A Figura 13 mostra alguns procedimentos realizados para essa análise.



(a) Dessecador (após a secagem)



(b) Forno-mufla



(c) Dessecador (resfriamento)



(d) Carvão volátil

Figura 13 – Procedimentos para análise do teor de material volátil

O teor de materiais voláteis é medido pela diferença de massa da amostra antes e depois do processo de aquecimento, conforme descrito pela equação 3.1. Sendo assim, a porcentagem do teor de material volátil é a média das amostras.

$$M_V = \frac{M_2 - M_3}{M_1} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde M_V é o teor de materiais voláteis (%), M_1 é a massa da amostra, M_2 é a massa do cadinho + massa da amostra, M_3 é a massa do cadinho após a mufla a 900°C.

• Teor de cinzas

A determinação do teor de cinzas (C_z) apresentada na Figura 14 foi realizada no analisador termogravimétrico (Macro-TG Analyser TGA-2000-A) por combustão completa da biomassa seguindo a norma ISO 18122 (2015). As análises foram realizadas em triplicata com as amostras de aproximadamente 0,9 g, a porcentagem do teor de cinzas foi baseada na média das três amostras.



Figura 14 – Procedimentos para análise do teor de cinzas

O teor de cinzas pode ser calculado a partir da diferença de massa antes e após o processo térmico, como mostra a equação 3.2. Onde C_z é o teor de cinzas (%), M_1 é a massa da amostra, M_2 é a massa do cadinho e M_3 é a massa do cadinho + massa da amostra.

$$C_z = \frac{M_3 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (3.2)$$

• Teor de carbono fixo

A porcentagem de carbono fixo (C_F) pode ser encontrada a partir dos valores do teor de materiais voláteis (M_V) e do teor de cinzas (C_z), como pode ser observado na equação 3.3.

$$C_F = 100 - (C_z + M_V) \quad (3.3)$$

3.2.2 Análise elementar

A análise elementar determina as proporções em porcentagens de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N). As amostras do resíduo de madeira de construção civil foram analisadas na Central Analítica no Instituto de Química da Universidade de São Paulo - USP por um analisador elementar - Perkin Elmer 2400 series ii, seguindo a norma ASTM E777/2008 e E778/2008. O teor de O foi calculado pela diferença entre as porcentagens da composição do biochar e as porcentagens de outros componentes: %C, %H e %N.

3.2.3 Poder Calorífico Superior

Segundo [Edgar A. Silveira, Galvão et al. \(2019\)](#) este ensaio se caracteriza pela medição da energia gerada pela combustão completa da amostra submetida a uma pressão constante e com injeção de oxigênio para garantir a combustão.

Os ensaios de poder calorífico superior (PCS) foram realizados em triplicata, por meio de uma bomba calorimétrica PARR modelo 6400 – Automatic Isooperibol Calorimeter, conforme metodologia descrita pela norma ISO 18125:2017. Foram confeccionados pellets (Figura 15) com ± 1 g para este ensaio. O PCS foi determinado pela média de dois ensaios válidos, calculado em Megajoules por quilograma (MJ/Kg).



(a) Peletizadora



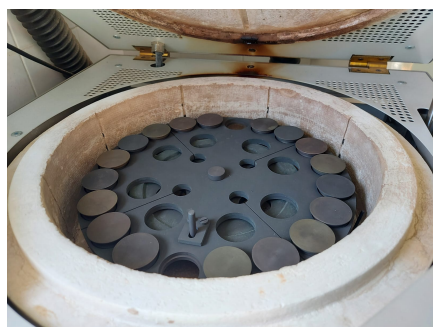
(b) Pellets

Figura 15 – Confeção dos pellets

3.3 Torrefação

No tratamento de torrefação em escala laboratorial foram realizados 19 ensaios em nonaplicata para amostras de $1,2 \pm 0,05$ g em cadinhos de alumina com um analisador termogravimétrico (Macro-TG Analyser TGA-2000-A) (Figura 16). O erro experimental

TG foi controlado abaixo de 0,5%. A taxa de aquecimento linear de $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ foi imposta da temperatura ambiente até $104\text{ }^{\circ}\text{C}$ e mantida isotermicamente por 30 min para garantir condições secas. O tratamento foi realizado em uma atmosfera inerte com uma vazão constante de gás nitrogênio (N_2) com grau de pureza mínimo de 99,2%, fluxo de $3\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ e taxa de aquecimento de $7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. As blendas foram torreficadas de acordo com as condições operacionais estabelecidas pelo RSM-CCD na Tabela (4) para otimização do processo de torrefação.



(a) Carrossel do TGA



(b) Sistema experimental

Figura 16 – Equipamentos para o processo de torrefação

Após o processo de torrefação foi obtido o rendimento gravimétrico mensurado pelo TGA. Realizou-se a análise química imediata das blendas torrefadas para obtenção do teor de cinzas e o rendimento energético foi calculado em uma planilha Excel.

O rendimento gravimétrico representa a quantidade de massa que permanece na estrutura ao final do processo de torrefação, é a razão entre a massa de biomassa torrefada (M_{to}) e a massa da biomassa “in natura” (M_{in}) seca (0% de umidade). É expresso em % pela equação 3.4 (ROUSSET; AGUIAR et al., 2011).

$$RG = \frac{M_{tor} [\text{g}]}{M_{cont} [\text{g}]} \times 100\% \quad (3.4)$$

O rendimento energético (RE) está relacionado com o rendimento gravimétrico e o PCS da madeira. Para o cálculo foi utilizada a equação 3.5 proposta por Bergman et.al (2004).

$$RE = RG \left(\frac{PCS_{torr}}{PCS_{nat}} \right) \quad (3.5)$$

Sendo RG o rendimento gravimétrico, PCS_{torr} o poder calorífico superior da madeira torreficada PCS_{nat} o poder calorífico superior da madeira in natura.

3.4 Otimização de torrefação: Metodologia de superfície de resposta

Para a otimização do biocombustível sólido e do processo de torrefação, foi realizado um CCD. Utilizou-se o RSM no software Design Expert (Stat-Ease Design-Expert, versão 13), onde foi realizado todo o planejamento do experimento. Os resultados obtidos foram avaliados mediante a aplicação da RSM e Análise de Variância (ANOVA). O MSR é um modelo que se adequa de forma estatística e qualitativa neste estudo de caso experimental. Sendo assim, foi possível definir os parâmetros ótimos do produto final.

O planejamento do experimento é apresentado na tabela 4 com os níveis codificados dos três fatores e as três respostas. Onde as variáveis controláveis (temperatura do processo de torrefação, tempo de residência e proporção das blendas) foram selecionadas com base na literatura e experimentos preliminares (MEHMOOD et al., 2018) e as respostas (rendimento gravimétrico (RG), rendimento energético (RE) e as cinzas) que serão avaliadas posteriormente ao processo de torrefação.

Tabela 4 – Parâmetros independentes RSM-CCD, níveis de fatores codificados e respostas do modelo.

Parâmetros de processo do independentes ^a			
Nome	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Proporção da Blenda (%)
Fator	A	B	C
Mínimo	200,00	40,00	0,00
Máximo	300,00	60,00	100,00
Baixo	-1 ↔ 220,27	-1 ↔ 44,05	-1 ↔ 20,27
Alto	+1 ↔ 279,73	+1 ↔ 55,95	+1 ↔ 79,73
Médio	250,00	50,00	50,00
Dev.Padrão	25,90	5,18	25,90
Resposta do modelo ^c (%)			
R_1	R_2	R_3	
RG	RE	Cinza	

^a: Variáveis de Entrada, ^b: Proporção de Pins de RCC, ^c: Variáveis de saída

Com o CCD ($\alpha = 1$), obteve-se um projeto com dezenove tratamentos, incluindo seis pontos axiais, seis pontos fatoriais fracionados e sete pontos centrais. Estes foram realizados aleatoriamente de acordo com o CCD, que está resumido na Tabela 4 e apresentado na Figura 17. O método CCD é adequado para o ajuste de uma superfície quadrática, que é confiável para diferentes otimizações de processo (SINGH; CHAKRABORTY; MONDAL, 2019).

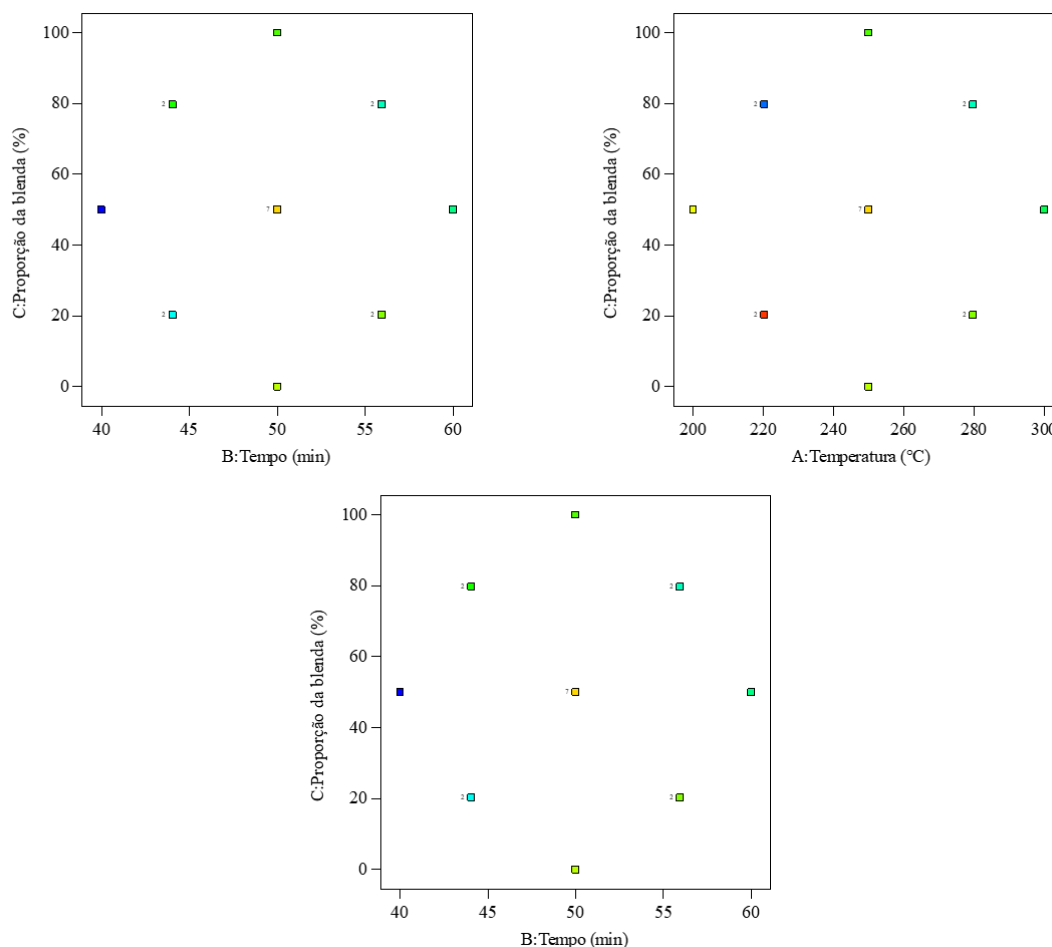


Figura 17 – Planejamento de experimento RSM-CCD

Os dados experimentais foram analisados estatisticamente usando o software Design Expert. Numerosos parâmetros estatísticos (coeficientes de correlação múltipla, preditos e ajustados e coeficiente de variação) de diferentes modelos polinomiais foram comparados para selecionar o modelo polinomial mais adequado. Foram, então, avaliados os parâmetros em que foi sugerido um modelo de função quadrática. Calcularam-se os efeitos das variáveis dependentes, os respectivos erros e verificou-se a significância estatística a um nível de confiança de 95 % ($p \leq 0,05$). Foi verificada a significância do ajuste do modelo com ANOVA, determinou-se o coeficiente de determinação (R^2) e foram realizados Testes do F para avaliar se a regressão foi preditiva ou não.

Para entender o efeito das condições do processo de torrefação nas variáveis de resposta, gráficos de superfícies 3D foram gerados usando o Design Expert Software. O critério de avaliação final da otimização das blendas para definir o melhor tratamento foi minimizar a temperatura e o tempo com intuito de gastar menos energia, maximizar o rendimento energético, gravimétrico e a proporção de Pinus do RCC para aproveitar o máximo do resíduo.

4 Resultado e análise

Encontra-se poucos estudo relacionado a torrefação de madeira de RCC. Na revisão bibliográfica não foi encontrado nenhum outro trabalho semelhante para comparar os dados encontrados na produção e otimização do biocombustível da blenda composto de resíduo de madeira Pinus da construção civil e Eucalipto mediante o processo de torrefação. Entretanto, existem alguns estudos relacionados a resíduos de descartes de madeira de construção civil e demolição que realizam o processo de termoquímicos. Sendo assim, foi feita uma comparação das propriedades energética das blendas torreficadas com as madeira Pinus e Eucaliptos torrefados sem contaminação de resíduos de construção.

4.1 Caracterização da biomassa “in natura”

Os valores obtidos referentes à análise elementar da madeira Pinus de RCC foram 45,73% para carbono, 6,24% para hidrogênio, 0,16% para nitrogênio e 47,87% para oxigênio e as razões atômicas $H/C = 1,63$ e $O/C = 0,79$. Uma análise elementar realizada em uma amostra de descartes de madeira de construção civil, [Dionizio et al. \(2019\)](#) obteve-se em 45,98% C, 5,49% H, 0,22% N e 48,31% O. Portanto, os valores obtidos para o resíduo de madeira Pinus de construção civil encontra-se dentro do esperado conforme na literatura para estrutura molecular da madeira ([BASU, 2013](#); [PFEIL, W.; PFEIL, M., 2003](#)) e a relação O/C na biomassa varia de 0,4 a 0,8 e H/C de 1,2 a 2,0 ([CHEN; PENG; BI, 2015](#)).

A partir do poder calorífico e dos ensaios de análise química imediata das amostras in natura foi possível a obtenção dos valores de material volátil, carbono fixo, teor de cinzas e poder calorífico superior, que estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Análise química imediata e poder calorífico

Espécies in natura	Cavaco de <i>Eucalyptus sp</i>	Madeira Pinus de RCC
Cinza (%)	0,669 ± 0,031	1,482 ± 0,045
Material volátil (%)	85,273 ± 0,056	82,480 ± 0,080
Carbono fixo (%)	14,058 ± 0,064	16,039 ± 0,092
Poder Calorífico (MJ.Kg ⁻¹)	19,415 ± 0,025	20,104 ± 0,003

A análise química imediata e poder calorífico superior para o resíduo de madeira Pinus da construção civil apresentou valores médios de 1,48% para o teor cinzas, 16,12% para o carbono fixo, 82,40% para materiais voláteis e um PCS de 20,10MJ.Kg⁻¹, diferentes aos valores encontrados por [Gusmão \(2015\)](#) 0,82%; 0,50%; 98,68%; 17,70MJ.Kg⁻¹ respectivamente. Ao analisar uma amostra de descartes de madeira de construção civil [Dionizio et al. \(2019\)](#) obteve 2,45% teor de cinzas, 17,51% para o carbono fixo, 80,06% para

materiais voláteis e um poder calorífico superior de $19,309MJ.Kg^{-1}$ e Iroba, Baik e Tabil (2017) obteve um teor de cinzas de 1,83% para resíduo de com madeira de demolição e construção.

Para a espécie de madeira Pinus sem contaminantes (argamassa,tinta,etc), a média de carbono fixo , materiais voláteis , teor de cinzas e poder calorífico superior encontrado por Crisóstomo et al. (2021) de 15,51%; 84,19%,0,3%; $20,45MJ.Kg^{-1}$, Lucas Henrique Oliveira et al. (2017) de 17,3%; 81,8%; 0,8%; $19,8MJ.Kg^{-1}$ e Batista (2015) de 16,95%; 82,76%; 0,29%; $20,38MJ.Kg^{-1}$ respectivamente. Ao analisar as médias do carbono fixo,materiais voláteis, cinza e poder calorífico superior, observa-se que não houve divergência entre o resíduo de madeira da construção e a biomassa sem contaminantes e exceto o teor de cinzas que apresentou um aumento de 1%. Durante o processo de combustão, a presença de outros materiais nas como por exemplo a argamassa, gesso entre outras impurezas contribui para o aumento do resíduo mineral no produto final.

A análise química imediata e o poder calorífico superior para o *Cavaco de Eucalyptus sp* apresentaram valores médios de 14,06% para o carbono fixo, 85,27% para materiais voláteis, 0,67% para o teor de cinzas e um poder calorífico de $19,41MJ.Kg^{-1}$. Valores encontrados para o carbono fixo, materiais voláteis, cinzas e poder calorífico superior para a mesma espécie (*Eucalyptus sp*) por Costa (2015) foi de 13,39%, 86,50%, 0,12% e $19,51MJ.Kg^{-1}$. Para o a especie de *Eucalyptus Grandis Galvão* (2018) obteve 18,51%,81,4%,0,09% e $20,09MJ.Kg^{-1}$ respectivamente.

No trabalho realizado por Bersch et al. (2018) a caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus sp*. obtive o valores para o carbono fixo de 13,27 a 16,23%, teor de materiais voláteis entre 83,17 a 86,16% e cinzas entre 0,57 a 0,60%. De acordo com Morais (2008), a variação dos valores da análise química imediata esta relacionada a localização, idade da árvore e a proporção entre celulose, hemicelulose e lignina (GALVÃO, 2018), além disso, a inclusão da casca da madeira na amostra aumenta o teor de cinza (VITAL et al., 1989).

Visto que o Brasil e um pais com uma vasta diversidade de resíduos com grande potencial energético e possibilidades de agregar valor destes resíduos para ser utilizar com fontes alternativas para geração de calor e conversão em energia renovável. E mantendo o ramo da sustentabilidade sem sobrecarregar as floretas energéticas com a combinação entre diferentes resíduos para produção de biocombustível, sendo assim, pode fornecer a quantidade necessária para suprir a demanda. Conforme o planejamento experimental, a proporção das blendas e apresentada na tabela 6, juntamente o teor de cinzas e poder calorífico superior da biomassa in natura.

Tabela 6 – Proporção da blenda

Espécies in natura	Blenda 1	Blenda 2	Blenda 3
Cavaco de <i>Eucalyptus sp.</i> (%)	50,00	20,30	79,70
Madeira Pinus de RCC (%)	50,00	79,70	20,30
Poder Calorífico (MJ.Kg ⁻¹)	19,760 ± 0,011	19,964 ± 0,003	19,555 ± 0,019
Cinza (%)	1,076 ± 0,027	1,316 ± 0,036	0,834 ± 0,026

4.2 Otimização da Torrefação:RSM

4.2.1 Blendas torreficadas

A mudança de cor da biomassa muda conforme a severidade (maior temperatura e tempo) de torrefação. Observa-se na Figura 18 que a mudança de cor da biomassa varia do marrom até preto com o aumento da faixa de temperatura de 200 – 300 °C. Isso ocorre a devido degradação térmica dos principais componentes da biomassa lignocelulósica, durante o processo de torrefação gera reações oxidativas entre os extrativos (na biomassa lenhosa), a hemicelulose gera subprodutos com cores diferentes, a lignina sofre reações de oxidação, entre outros fatores que modificam a coloração da biomassa torrefada (BERGMAN et al., 2005),(NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014) e(CHEN; LIN, B.-J. et al., 2021).



Figura 18 – Blendas Torreficadas

A biomassa para uso energético deve conter o maior poder calorífico possível para liberar a maior quantidade de calor durante a combustão. Entretanto, o processo de torrefação aumenta significativamente o poder calorífico, mostrando-se como uma alternativa viável para melhorias energéticas na biomassa (NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014). Ao observar a tabela 7 é notável que o PCS aumenta conforme a elevação de temperatura.

Tabela 7 – Poder calorífico da biomassa torrefada

Temp. (°C)	Tempo (min)	Amostra	Poder Calorífico (MJ.Kg ⁻¹)
200,00	50,00	Blenda 1	19,981 ± 0,009
220,00	44,05	Blenda 2	20,343 ± 0,036
220,00	55,95	Blenda 2	20,291 ± 0,081
220,00	44,05	Blenda 3	19,894 ± 0,090
220,00	55,95	Blenda 3	20,024 ± 0,021
250,00	40,00	Blenda 1	20,737 ± 0,004
250,00	50,00	Blenda 1	20,755 ± 0,021
250,00	60,00	Blenda 1	20,803 ± 0,022
250,00	50,00	Madeira Pinus de RCC	21,149 ± 0,171
250,00	50,00	Cavaco de <i>Eucalyptus sp.</i>	20,602 ± 0,011
280,00	44,05	Blenda 3	21,680 ± 0,027
280,00	55,95	Blenda 2	22,508 ± 0,030
280,00	44,05	Blenda 2	22,202 ± 0,014
280,00	55,95	Blenda 3	22,023 ± 0,038
300,00	50,00	Blenda 1	24,102 ± 0,001

Observa-se a influência do tempo no tratamento de 250 °C, para 40, 50 e 60 minutos para a mesma blenda, obteve-se um aumento no PCS, 20,74, 20,75 e 20,80 (MJ.Kg⁻¹) respectivamente. Com tratamento de 300°C, o PCS aumentou aproximadamente 22% em relação à biomassa in natura.

4.2.2 Planejamento experimental e análise de superfície de resposta

O desenho resultante do planejamento dos experimentos (DOE) e os dados experimentais obtidos (RG (R_1), RE (R_2) e Cinzas (R_3)) definidos para o RSM são mostrados na Tabela 8. Considerando os 19 experimentos realizados, o RG, RE e Cinzas variaram entre 62,93–98,44%, 76,75- 99,547% e 0,70-2,05%, respectivamente, dependendo da gravidade da torrefação.

Tabela 8 – Planejamento experimental

Std	Run	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Response 1	Response 2	Response 3
		Temp. (°C)	Tempo (min)	Proporção do Blend ^a (%)	RG ^b (%)	RE ^c (%)	Cinzas (%)
		A	B	C	R1	R2	R3
11	1	250,00	40,00	50,00	89,048 ± 0,247	93,456 ± 0,265	1,310 ± 0,060
5	2	220,00	44,05	79,73	96,482 ± 0,183	98,306 ± 0,225	1,540 ± 0,010
7	3	220,00	55,95	79,73	95,659 ± 0,252	97,228 ± 0,378	1,914 ± 0,021
16	4	250,00	50,00	50,00	86,780 ± 0,377	91,154 ± 0,405	1,281 ± 0,000
15	5	250,00	50,00	50,00	86,848 ± 0,359	91,225 ± 0,387	1,303 ± 0,016
2	6	280,00	44,05	20,27	76,980 ± 0,370	85,348 ± 0,426	1,085 ± 0,004
8	7	280,00	55,95	79,73	73,331 ± 0,477	82,673 ± 0,544	2,051 ± 0,011
12	8	250,00	60,00	50,00	84,701 ± 0,376	89,173 ± 0,405	1,221 ± 0,009
10	9	300,00	50,00	50,00	62,933 ± 0,699	76,759 ± 0,854	1,773 ± 0,006
1	10	220,00	44,05	20,27	96,853 ± 0,101	98,529 ± 0,345	0,845 ± 0,014
6	11	280,00	44,05	79,73	76,549 ± 0,640	85,130 ± 0,713	1,902 ± 0,006
14	12	250,00	50,00	100,00	87,172 ± 0,317	91,705 ± 0,620	1,948 ± 0,042
4	13	280,00	55,95	20,27	73,896 ± 0,819	83,222 ± 0,932	1,175 ± 0,015
13	14	250,00	50,00	0,00	85,718 ± 0,309	90,964 ± 0,349	0,703 ± 0,008
9	15	200,00	50,00	50,00	98,444 ± 0,046	99,547 ± 0,083	1,045 ± 0,017
19	16	250,00	50,00	50,00	87,167 ± 0,346	91,560 ± 0,374	1,221 ± 0,019
18	17	250,00	50,00	50,00	86,821 ± 0,423	91,197 ± 0,453	1,087 ± 0,015
17	18	250,00	50,00	50,00	86,774 ± 0,359	91,147 ± 0,387	1,317 ± 0,007
3	19	220,00	55,95	20,27	96,002 ± 0,226	98,306 ± 0,263	0,876 ± 0,002

^a: Proporção de Pins de RCC, ^b: Rendimento gravimétrico (RG), ^c:Rendimento energético (RE).

Com a elevação da temperatura aumenta a liberação de voláteis, a perda de umidade e a decomposição dos componentes orgânicos da biomassa (principalmente hemiceluloses) diminuindo assim o RG (BERGMAN et al., 2005; MAMVURA; DANHA, 2020). Observa-se que com temperatura mínima e máxima de torrefação a perda de massa foi de aproximadamente 2% e 37% respectivamente. Em relação à proporção das blendas não houve influência significativa.

Para a madeira de RCC e cavaco eucalipto, com tempo de residência de 50min, os valores médios de 87,17% e 85,72% do rendimento gravimétrico encontrados para a RUN12 e RUN14 foram diferentes aos rendimentos obtidos por (PEÉREZ et al., 2015) numa torrefação de *Eucalyptus Globulus* e *Pinus Radiata* com rendimentos de 83,1% e 80,1% a 250° e 65,1% e 59,2% para 280°. (BATISTA, 2015) em estudos de torrefação do *Pinus Elliottii* com as temperaturas de 220°C, 250°C e 300°C obteve rendimentos de 99,47%, 95,67% e 67,10% para o tempo de 30min e para o tempo de 60min, 95,46%, 84,31% e 45,49% respectivamente.

Os resultados mostram uma boa qualidade das blendas visto que elas reterão cerca de 70% a 90% do conteúdo energético inicial (PRINS; PTASINSKI; JANSSEN, 2006). PEÉREZ et al. (2015) em estudos de torrefação, o RE para a espécie *Eucalyptus Globulus* obtido 90,7% e 72,1% e para espécie *Pinus Radiata* 89,2% , 71,3% conforme com as temperaturas 250° e 280°. Com a temperatura mínima de torrefação, obteve-se o maior rendimento energético 99,5%. O RUN 9 obteve o maior PCS, em contrapartida, obteve os menores

rendimentos energético e gravimétrico.

Com os dados experimentais obteve-se a variação do teor de cinzas de 0,703 até 2,051% de cinzas. Para a amostra 1 com tratamento de de 250°C com tempo de 50min obteve-se 1,95% de cinzas, esse valor relativamente alto ao ser comparado com (BATISTA, 2015). Com tratamento de torrefação do *Pinus Elliottii* com as temperaturas de 220°C, 250°C e 300°C, obtiveram os teores de cinzas de 0,23%, 0,32% e 0,27% para o tempo de 30min e para o tempo de 60min, 0,26%,0,36% e 0,60% respectivamente.

O efeito das variáveis independentes rendimento gravimétrico (R_1), rendimento energético(R_2) e cinzas (R_3)) são apresentados na Tabela 8. Os coeficientes da equação polinomial foram calculados a partir de dados experimentais para prever os valores da variável resposta. As equações de regressão para cada variável de resposta, obtidas a partir da metodologia de superfície de resposta, são mencionadas nas Eqs 4.1,4.2 e 4.2.

$$C_Z = 1,24 + 0,1657A + 0,0362B + 0,4042C - 0,0207AB - 0,0050AC + 0,0503BC + 0,0772A^2 + 0,0264B^2 + 0,0476C^2 \quad (4.1)$$

$$RG = 86,83 - 10,54A - 1,12B + 0,0538C - 0,5785AB - 0,0352AC - 0,0132BC - 1,94A^2 + 0,2511B^2 + 0,0993C^2 \quad (4.2)$$

$$RE = 91,22 - 6,91A - 0,9583B - 0,0602C - 0,4102AB + 0,0668AC - 0,1482BC - 0,9085A^2 + 0,2093B^2 + 0,2163C^2 \quad (4.3)$$

Os resultados da análise estatística (ANOVA) aprestados na Tabela 9 revelaram modelo de função quadrática com valores de coeficiente de determinação (R^2) representa bem os dados experimentais. Quanto maior o R^2 melhor é o modelo para representar os dados experimentais. Nota-se que nos gráficos da Figura 19, com o ajuste do modelo linear os pontos estão bem distribuídos, e quanto mais próximos da reta melhor e a predição do modelo.

Para rendimento gravimétrico, rendimento energético e cinzas o sendo 0,9961, 0,9934 e 0,9511, respectivamente (Tabela 9). Com a regressão linear, realizada a partir dos dados experimentais e previstos, foi obtida a curva de R^2 apresentada no gráfico da Figura 19.

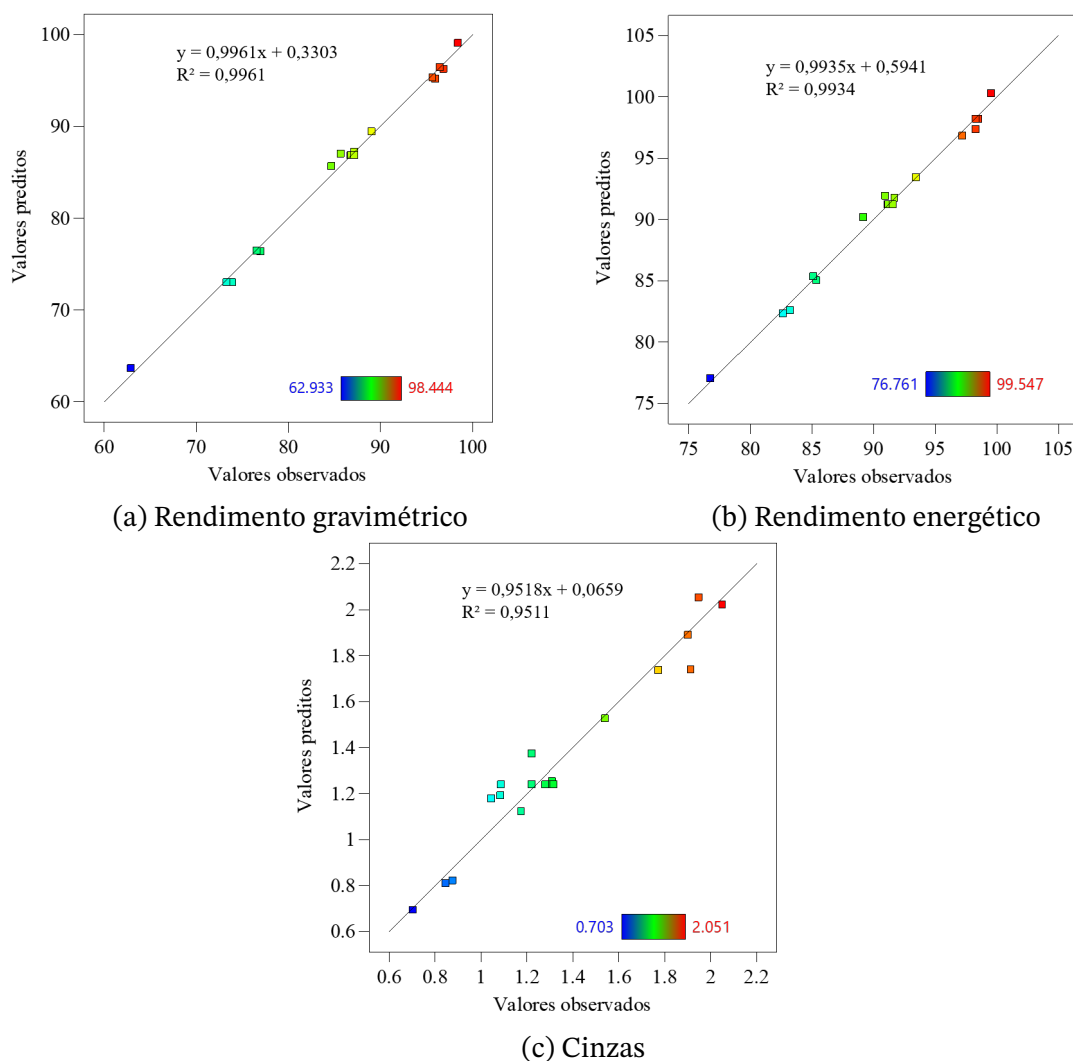


Figura 19 – Gráfico de valores da variável resposta previstos para cada ensaio pelo modelo quadrático ajustado versus o valor experimental observado.

O R^2 previsto para o rendimento gravimétrico e rendimento energético foi de 0,9708 e 0,9507, sendo assim, está razoável, em concordância com o R^2 ajustado de 0,9922 e 0,9867, nesta ordem. Ou seja, a diferença é inferior a 0,2. Já para cinzas O R^2 previsto de 0,6948 não é tão próximo do R^2 ajustado de 0,9016 como normalmente se poderia esperar. Ou seja, a diferença é superior a 0,2. Portanto, os modelos são adequados para estabelecer a relação entre variáveis dependentes e independentes, sendo assim confiáveis para o experimento.

A análise estatística completa (ANOVA) para as variáveis de resposta é fornecida na Tabela 9. Os modelos obtidos para RG, RE e cinzas apresentaram valor F de 254,68, 149,68 e 19,32. Quanto maior o F-valor, menor o p-valor correspondente. O p-valor $< 0,05$ indicam que os termos do modelo são significativos. Todos os modelos apresentaram valores de $p < 0,0001$, concluindo que são estatisticamente significativos. Os termos lineares (temperatura e tempo) e quadrático (temperatura (A^2)) são significativos para os modelos

RG e RE. Os termos significativos para as cinzas foram temperatura, proporção da blenda e temperatura(A^2), e resultado do F valor de 2,42 para a falta de ajuste implica que esta é insignificante em relação ao erro puro.

Tabela 9 – ANOVA: Modelo quadrático para RG,RE e cinzas

Source	Sum of Squares	Df	Mean of Square	F-value	p-value	Remark
Rendimento gravimétrico (RG)						
Model	1593,97	9	177,11	254,68	< 0,0001	*
A-Temperatura	1517,56	1	1517,56	2182,26	< 0,0001	*
B-Time	17,11	1	17,11	24,61	0,0008	*
C-Proporção do Blend	0,0396	1	0,0396	0,0569	0,8168	
AB	2,68	1	2,68	3,85	0,0814	
AC	0,0099	1	0,0099	0,0143	0,9075	
BC	0,0014	1	0,0014	0,002	0,9651	
A^2	51,16	1	51,16	73,57	< 0,0001	*
B^2	0,861	1	0,861	1,24	0,2947	
C^2	0,1346	1	0,1346	0,1935	0,6704	
Residual	6,26	9	0,6954			
Lack of Fit	6,15	5	1,23	45,52	0,0013	*
Pure Error	0,1081	4	0,027			
Cor Total	1600,23	18				
R^2	0,9961	Adjusted R^2	0,9922		Predicted R^2	0,9708
Rendimento energético (RE)						
Model	679,79	9	75,53	149,56	< 0,0001	*
A-Temperatura	651,45	1	651,45	1289,9	< 0,0001	*
B-Time	12,55	1	12,55	24,85	0,0008	*
C-Proporção do Blend	0,0499	1	0,0499	0,0987	0,7605	
AB	1,33	1	1,33	2,64	0,1385	
AC	0,0355	1	0,0355	0,0703	0,7969	
BC	0,1761	1	0,1761	0,3487	0,5694	
A^2	11,24	1	11,24	22,25	0,0011	*
B^2	0,5984	1	0,5984	1,18	0,3047	
C^2	0,6364	1	0,6364	1,26	0,2907	
Residual	4,55	9	0,505			
Lack of Fit	4,43	5	0,8853	29,78	0,0029	*

Continua na próxima página

Tabela 9 – Continuação da página anterior

Source	Sum of Squares	Df	Mean of Square	F-value	p-value	Remark
Pure Error	0,1189	4	0,0297			
Cor Total	684,34	18				
R^2	0,9934	Adjusted R^2	0,9867		Predicted R^2	0,9867
Cinzas						
Model	2,75	9	0,3054	19,32	< 0,0001	*
A-Temperatura	0,3748	1	0,3748	23,71	0,0009	*
B-Time	0,0179	1	0,0179	1,13	0,3151	
C-Proporção do Blend	2,23	1	2,23	141,13	< 0,0001	*
AB	0,0034	1	0,0034	0,2179	0,6517	
AC	0,0002	1	0,0002	0,0127	0,9129	
BC	0,0202	1	0,0202	1,28	0,2875	
A^2	0,0813	1	0,0813	5,14	0,0496	*
B^2	0,0095	1	0,0095	0,6028	0,4574	
C^2	0,031	1	0,031	1,96	0,1951	
Residual	0,1423	9	0,0158			
Lack of Fit	0,1069	5	0,0214	2,42	0,2061	
Pure Error	0,0353	4	0,0088			
Cor Total	2,89	18				
R^2	0,9508	Adjusted R^2	0,9016		Predicted R^2	0,6948

*: significância p-valor $\leq 0,05$

Os dados experimentais coletados das respostas das variáveis independentes foram analisados. Os resultados mostraram que as equações 4.1, 4.2 e 4.3 podem ser usadas para desenhar os gráficos de superfície de resposta e prever o RG, RE e cinzas. Nas Figuras 20, 21 e 22 mostram os gráficos tridimensionais (3D) de superfície e contorno de resposta dos modelos funções quadráticas que apresentam o efeito das variáveis independentes durante o processo de torrefação.

A Figura 20 apresenta a interação entre fatores temperatura, tempo e proporção da blenda para o rendimento gravimétrico. Na Figura 20(a), a superfície da curva mostra a integração entre tempo e temperatura, com o aumento da severidade (maior temperatura e tempo) da torrefação ocorre uma maior perda de massa. Nota-se também que o tempo e relevante para o tratamento mais severo da torrefação, em temperaturas baixa o tempo não tem muita influência no RG.

Na Figura 20(b), analisando a interação do RG e a proporção das blendas, percebe-se que a proporção das blendas manteve-se quase que constante para todas combinações.

Com o aumento da temperatura de torrefação, o RG diminui. Ao analisar o RG em relação à interação do tempo e proporção das blendas 20(c) observa-se que existe uma dependência, porem, uma dependência suave. O RG não depende muito do tempo e nem da proporção das blendas, pois, possui diferença quase insignificante.

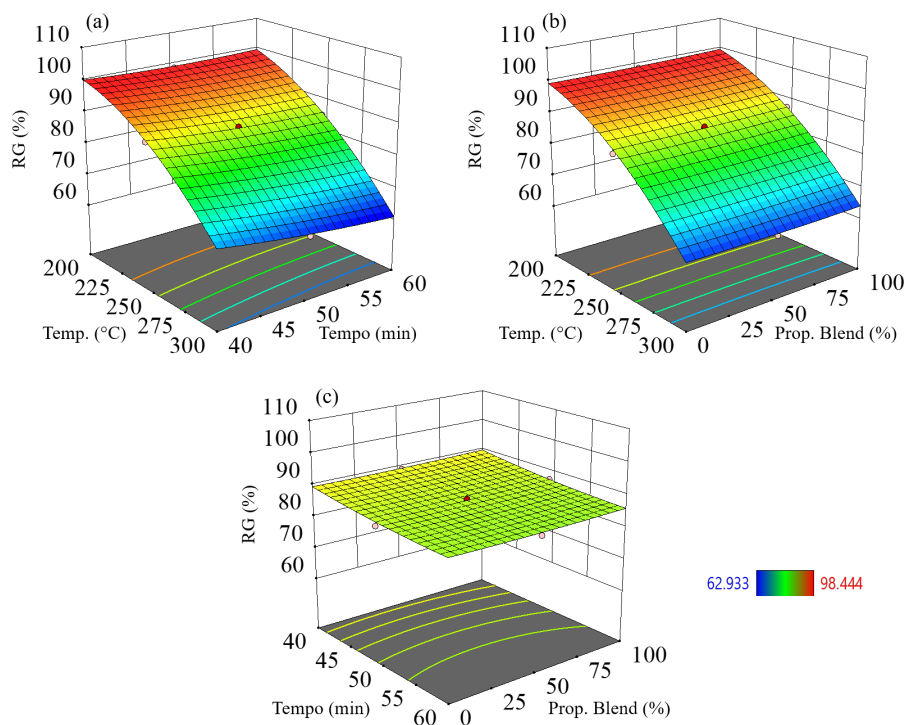


Figura 20 – Gráficos de superfície e contorno de resposta das interações entre (a) tempo e temperatura, (b) temperatura e proporção da blenda e (c) tempo e proporção da blenda para o rendimento gravimétrico.

A Figura 21 apresenta a interação entre fatores temperatura, tempo e proporção da blenda para o rendimento energético. Na Figura 21(a) apresenta a mesma interações que a Figura 20(a), ou seja, quanto menor a temperatura maior o RE, e o tempo só é relevante para tratamento mais severo da torrefação. Na Figura 21(b) o comportamento das interações tempo e proporção da blenda e igual o da Figura 20(b). Observa-se na Figura 21 c, que a relação entre tempo e proporção das blendas uma dependência quase insignificante para rendimento energético.

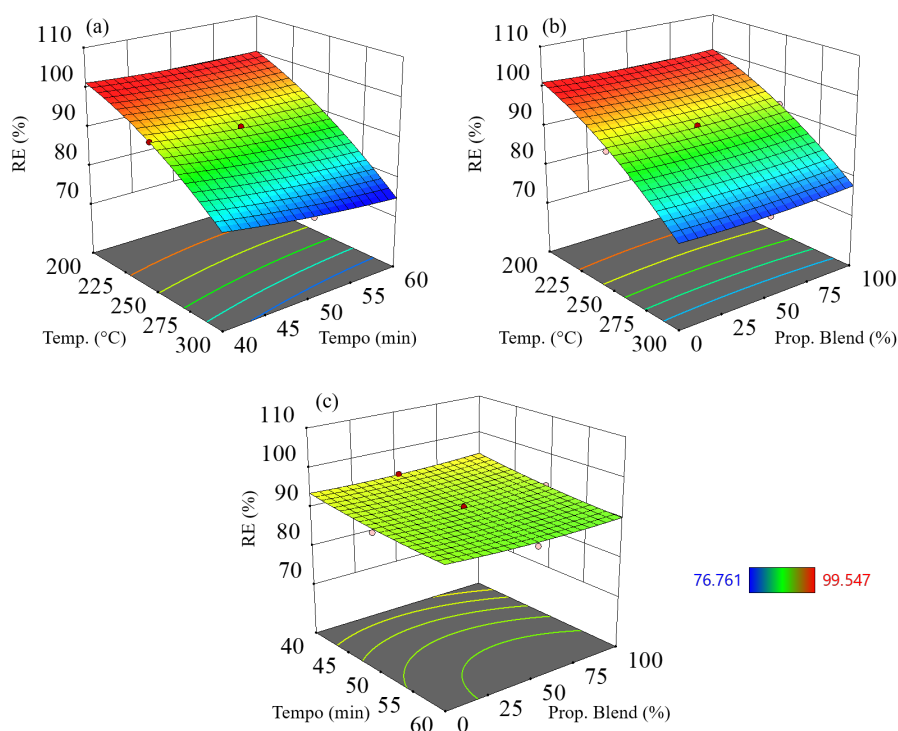


Figura 21 – Gráficos de superfície e contorno de resposta das interações entre (a) tempo e temperatura, (b) temperatura e proporção da blenda e (c) tempo e proporção da blenda para o rendimento energético.

Os gráficos de superfície e contorno de resposta da Figura 22, mostra a interações entre os fatores temperatura, tempo e proporção da blenda para as cinzas. Analisando a Figura 22(a), observa-se que com o aumento da severidade da torrefação tem-se um aumento de cinzas. Em temperaturas mais baixas o tempo é quase irrelevante. Conforme na literatura, com o aumento da severidade de torrefação tem um maior teor de cinza no produto final.

Na Figura 22(b), a temperatura é proporcional ao teor de cinzas, ou seja, com o aumento da temperatura o produto final terá maior teor de cinza ao comparar com a biomassa in natura. Ao analisar as cinzas em relação à proporção das blendas, nota-se que com o aumento da proporção da madeira RCC aumenta o teor de cinza, esse comportamento já é esperado visto que a madeira Pinus in natura possui um teor de cinzas maior que o eucalipto, com o aumento da severidade da torrefação o teor de cinzas aumenta significativamente.

Analisando a Figura 22(c) é possível ver que ao adicionar uma maior proporção de madeira de RCC começa a ter uma maior dependência do tempo no tratamento, ou seja, quanto maior o tempo maior o teor de cinzas. Com a análise da Figura 22 é possível ver que o comportamento mais expressável, mais pronunciado da curva da superfície e a Figura 22(b). Portanto, a temperatura e a proporção de blendas são fatores que realmente influenciam no teor de cinzas.

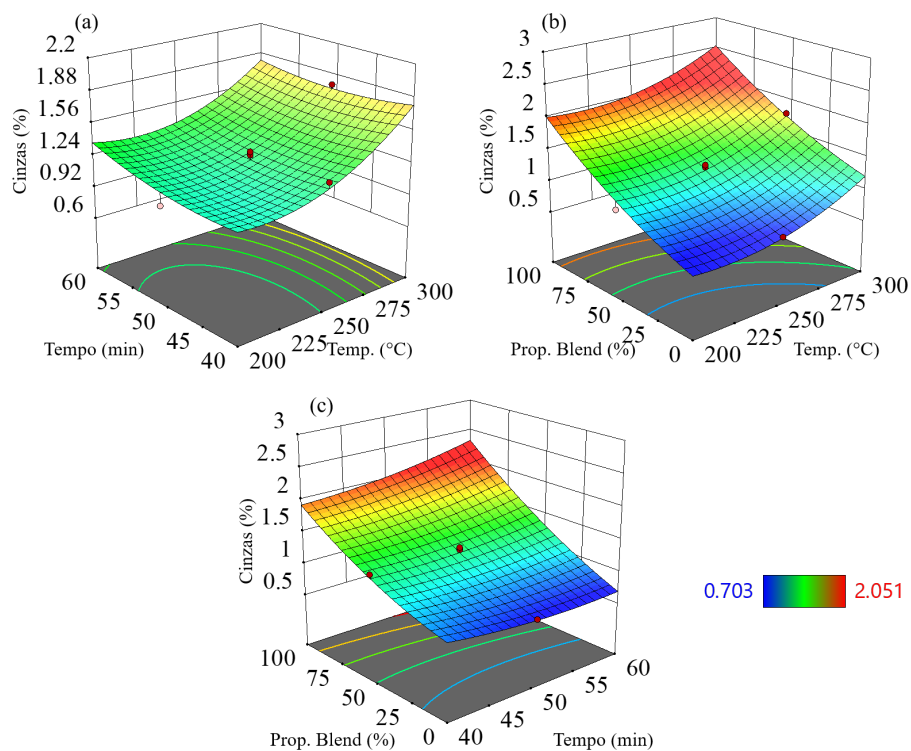


Figura 22 – Gráficos de superfície e contorno de resposta das interações entre (a) tempo e temperatura, (b) temperatura e proporção da blenda e (c) tempo e proporção da blenda para o rendimento cinza.

4.2.3 Blenda otimizada

A otimização do RSM foi estabelecida para maximizar o RG e o RE, e minimizar as cinzas considerando os fatores temperatura, tempo e proporção da blenda. Com base nos dados experimentos o RSM, gerou 38 soluções possíveis e a melhor blenda possui 69,6% de Pinus de RCC, a temperatura de torrefação foi de 220,27° com tempo de residencia de 44,05min. Os resultados detalhados da solução selecionada são apresentados na Tabela 10, aplicando-se as condições ótimas obtidas pelo RSM, resultando na blenda ótimo torrefada.

O biocombustível sólido apresentaram melhores propriedades para fins energéticos, visto que pode ser usada para geração de calor e conversão em energia, aplicada em caldeiras, siderúrgicas, indústrias de cimento, uso doméstico, entre outras aplicações.

Tabela 10 – Blendas otimizadas

Nº	Temperatura	Tempo	Proporção da blenda	RG	RE	Cinzas
1	220,270	44,054	69,600	96,340	98,086	1,377
2	220,270	44,054	69,278	96,338	98,082	1,372
3	220,270	44,054	69,060	96,336	98,080	1,369
4	220,270	44,054	70,135	96,344	98,091	1,384
5	220,270	44,054	70,383	96,346	98,094	1,388
6	220,270	44,054	68,652	96,333	98,076	1,363
7	220,270	44,054	70,897	96,351	98,099	1,395
8	220,270	44,054	71,430	96,355	98,105	1,403
9	220,270	44,054	67,465	96,324	98,065	1,347
10	220,271	44,054	67,247	96,322	98,062	1,344
11	220,271	44,099	68,693	96,325	98,068	1,364
12	220,270	44,054	66,269	96,315	98,054	1,330
13	220,270	44,055	72,932	96,367	98,123	1,425
14	220,491	44,054	68,916	96,289	98,044	1,367
15	220,270	44,054	65,572	96,310	98,048	1,321
16	220,270	44,054	73,771	96,375	98,133	1,437
17	220,270	44,135	67,514	96,310	98,051	1,348
18	220,568	44,054	67,366	96,262	98,017	1,346
19	220,270	44,054	64,605	96,304	98,040	1,307
20	220,270	44,054	74,407	96,381	98,141	1,446
21	220,585	44,073	68,422	96,263	98,021	1,361
22	220,270	44,054	74,850	96,384	98,147	1,453
23	220,272	44,054	76,747	96,402	98,171	1,481
24	221,296	44,054	68,595	96,119	97,914	1,364
25	221,359	44,054	68,906	96,108	97,908	1,368
26	220,270	44,054	78,099	96,415	98,191	1,501
27	220,270	44,054	60,107	96,276	98,010	1,247
28	220,592	44,054	60,601	96,212	97,962	1,254
29	220,270	44,054	79,271	96,427	98,208	1,519
30	220,270	44,054	58,883	96,269	98,003	1,231
31	220,271	44,054	57,306	96,261	97,996	1,211
32	220,271	44,419	79,730	96,367	98,147	1,529
33	220,270	44,910	65,298	96,163	97,900	1,322
34	220,270	44,054	52,951	96,241	97,982	1,156
35	224,212	44,054	74,948	95,540	97,519	1,459
36	220,270	45,634	59,735	96,013	97,753	1,249
37	220,270	45,530	51,632	95,992	97,750	1,143
38	220,270	45,434	46,317	95,990	97,770	1,077

4.3 Desafios e direções futuras

Nos próximos trabalhos deve ser investigado o impacto ambiental causado pelos gases emitidos durante a combustão da blenda otimizada, e os gases emitidos no aterro sanitário devido ao aterramento do resíduo de madeira de construção civil. Sabe-se que

durante a combustão da biomassa são emitidos gases poluentes como monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono, amônia, sulfeto de hidrogênio entre outros gases (GUSMÃO, 2015) e (CHEN; LIN, B.-J. et al., 2021). Além disso, compostos orgânicos como dibenzo-p-dioxinas policloradas (PCDD) e os dibenzofuranos policlorados (PCDF) podem ser formados durante a torrefação (CHEN; LIN, B.-J. et al., 2021).

Por outro lado, o descarte indevido da madeira também gera impactos negativos no meio ambiente. A decomposição em aterro sanitário produz uma quantidade significativa de chorume e biogás, rico em metano. O chorume causa a poluição dos lençóis freáticos e aquíferos subterrâneos. Ao comparar os gases que contribuem para o efeito estufa, levando ao aquecimento global, o metano é 23 vezes mais agressivo que o dióxido de carbono (LAPA et al., 2004).

Técnicas como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) nos permitir identificar, calcular e mensurar o desempenho ambiental de produtos, serviços e processos, identificando os pontos de maior concentração de emissões de gases poluentes e analisar quais ações podem ser tomadas para alcançar sua redução de forma eficiente, com menor impacto e melhor gerenciamento do produto (OLIVEIRA, J. A. de, 2021). Visto que tanto a combustão quanto o aterramento da biomassa causam impactos ambientais, faz-se necessária a realização de uma análise do ciclo de vida e quantificar as emissões de gases poluentes no processo de combustão e do aterramento, e com isso analisar qual a solução para o fim de vida do resíduo.

Posteriormente, a ACV, se a blenda for enquadrada com fonte renovável, e a combustão tiver impacto ambiental igual ou menor em relação ao aterramento é interessante a compactação do produto. Para fins de logística e controle de qualidade do biocombustível, produtos como pellets e briquetes de madeira facilitam a comercialização e transporte, agregando valor ao biocombustível. Quanto ao cenário dos produtos adensados, o comércio tende a crescer, visto que a biomassa tem aumentado sua contribuição na matriz energética brasileira e mundial.

O Brasil possui condições vantajosas e tem capacidade de aproveitar uma diversidade de resíduo para fins energéticos, sem sobrecarregar as florestas energéticas e comprometer outros setores como a indústria da construção civil, moveleira e celulose. Portanto, o uso desses resíduos podem aumentar a contribuição de fontes renováveis na matriz energética do país.

5 Conclusão

Há urgência por mudanças na matriz energética, inovando a produção de energia tradicional através da implementação de fontes sustentáveis. Por meio desse estudo, obteve-se um biocombustível com ótimas propriedades energéticas além dos melhores parâmetros para o processo de torrefação. O planejamento do experimento é de suma importância, assim como foi fundamental nessa pesquisa a utilização de técnicas estatísticas como a da metodologia de superfície de resposta. Com os gráficos da superfície de resposta obtida a partir de dados experimentais vê-se que há evidência de que o rendimento gravimétrico e energético diminui conforme a severidade do processo de torrefação; com a temperatura severa do processo e uma maior proporção de madeira de RCC contribui consideravelmente para o aumento do teor de cinzas. Com temperatura de 220°C, um tempo de residência de 44,05min e uma blenda com 69,6% de resíduo de madeira de construção civil e 30,4% de madeira de eucalipto produz biocombustíveis sólidos com alto grau de eficiência energética. Diante do cenário atual, essa blenda tem grandes chances de ser adicionada à matriz energética, visto que ela possui um rendimento gravimétrico de 96,37%, energético de 98,09% e menor teor de cinzas com 1,38%. A blenda otimizada pode ser usada para geração de calor e conversão em energia, sendo aplicada em caldeiras, siderúrgicas, indústrias de cimento, entre outros usos. Nos próximos trabalhos deve ser investigado o impacto ambiental causado pelos gases emitidos durante a combustão da blenda otimizada, e os gases emitidos no aterro sanitário devido ao aterramento do resíduo de madeira. Caso a blenda seja enquadrada como fonte renovável, e a combustão tiver impacto ambiental igual ou menor com relação ao aterramento, é interessante a compactação do produto. Para fins de logística e controle de qualidade do biocombustível, produtos como pellets e briquetes de madeira facilitam a comercialização e transporte, agregando valor ao biocombustível e aproveitando o máximo desse resíduo.

Referências

- ABRELPE, A. B. d. E. d. L. P. e. R. E. **Panorama 2021 dos resíduos sólidos no Brasil**. 2021. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 23 ago. 2022. Citado na p. 22.
- ANDERSON-COOK, C. M.; BORROR, C. M.; MONTGOMERY, D. C. Response surface design evaluation and comparison. **Journal of Statistical Planning and Inference**, Elsevier, V. 139, N. 2, p. 629–641, 2009. Citado na p. 36.
- BACKES, H. S.; HEMKEMEIER, M.; DALMORA, G.; TONIN, S. Valorização de cinzas de fundo de caldeira através da produção de alcalinizante: uma proposta de economia circular. **Research, Society and Development**, V. 11, N. 9, e2711931312–e2711931312, 2022. Citado na p. 28.
- BASU, P. **Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory**. Academic press, 2013. Citado nas pp. 26, 29, 47.
- BATISTA, J. A. N. Torrefação do *Pinus elliottii* para fins energéticos. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2015. Citado nas pp. 48, 51, 52.
- BEN. **Relatório Síntese 2022 Ano base 2021**. 2022. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Citado na p. 19.
- BERGMAN, P. C.; BOERSMA, A.; ZWART, R.; KIEL, J. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. **Energy Research Centre of the Netherlands, ECN-C-05-013**, 2005. Citado nas pp. 31, 32, 49, 51.
- BERSCH, A. P.; BRUN, E. J.; PEREIRA, F. A.; SILVA, D. A.; DE BARBA, Y. R.; JUNIOR, J. R. D. Caracterização Energética Da Madeira De Três Materiais Genéticos De *Eucalyptus Sp*. **Floresta**, V. 48, N. 1, p. 87–92, 2018. Citado na p. 48.
- BRASIL, A. C. D. M.; GHESTI, G. F.; RODRIGUES, J. P.; GUIMARÃES, M. G.; EVARISTO, R. B. W. Caracterização e aplicação de biomassa em tecnologias de conversão termoquímica. In: abr. 2021. ISBN 9786558460145. DOI: 10.1021/ef2016649. Disponível em: <<https://doi.org/10.26512/9786558460145>>. Citado nas pp. 26–29.
- CAVALCANTI, W. M.; ALVES, E. J. Aplicação de resíduos da construção civil como aglomerado de compósitos de madeira péletes/briquetes: um estudo bibliográfico e documental. **1º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, Gramado**, 2018. Citado nas pp. 13, 20.
- CHAVES, B. S. Potencial energético de *Arundo donax L.* E *Phyllostachys aurea Riviére & C. Riviére* na forma de biocombustíveis sólidos, 2020. Citado nas pp. 27, 29.

- CHEN, W.-H.; KUO, P.-C.; LIU, S.-H.; WU, W. Thermal characterization of oil palm fiber and eucalyptus in torrefaction. **Energy**, Elsevier, V. 71, p. 40–48, 2014. Citado na p. 31.
- CHEN, W.-H.; LIN, B.-J.; LIN, Y.-Y.; CHU, Y.-S.; UBANDO, A. T.; SHOW, P. L.; ONG, H. C.; CHANG, J.-S.; HO, S.-H.; CULABA, A. B. et al. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. **Progress in Energy and Combustion Science**, Elsevier, V. 82, p. 100887, 2021. Citado nas pp. 13, 14, 25, 30–34, 49, 60.
- CHEN, W.-H.; PENG, J.; BI, X. T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V. 44, p. 847–866, 2015. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114010910>>. Citado nas pp. 13, 26–28, 30, 31, 34, 47.
- CHERUBINI, F. The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. **Energy conversion and management**, Elsevier, V. 51, N. 7, p. 1412–1421, 2010. Citado na p. 18.
- CONAMA, C. N. D. M. A. **Resolução conama nº 307, de 5 de julho de 2002**. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE CONAMA, 2002. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2002_Res_CONAMA_307.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2022. Citado nas pp. 21–23.
- COSTA, E. V. S. e. a. Influência da torrefação nas propriedades dos briquetes produzidos com madeira de eucalyptus sp. Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, 2015. Citado na p. 48.
- CRISÓSTOMO, M. C.; SILVA, M. F. da; VALE, A. T. do; CHAVES, B. S. Caracterização energética de madeira de *E. grandis*, *Pinus sp.*, *T. vulgaris* e *P. lecointei*, 2021. Citado na p. 48.
- CUNHA, H. **No DF, cresce número de lançamentos e vendas de imóveis e setor deve ter melhor ano em uma década**. 84 Notícias, 2022. Disponível em: <<https://www.oitoquatronoticias.com.br/no-df-cresce-numero-de-lancamentos-e-vendas-de-imoveis-e-setor-deve-ter-melhor-ano-em-uma-decada/>>. Acesso em: 23 ago. 2022. Citado na p. 15.
- DARKO, A.; CHAN, A. P.; OWUSU-MANU, D.-G.; AMEYAW, E. E. Drivers for implementing green building technologies: An international survey of experts. **Journal of cleaner production**, Elsevier, V. 145, p. 386–394, 2017. Citado na p. 20.
- DAS, P.; CHANDRAMOHAN, V.; MATHIMANI, T.; PUGAZHENDHI, A. A comprehensive review on the factors affecting thermochemical conversion efficiency of algal biomass to energy. **Science of The Total Environment**, Elsevier, V. 766, p. 144213, 2021. Citado nas pp. 30, 31.

- DELGADO, F.; FILGUEIRAS, R. A crise do setor de óleo e gás e os desafios da transição energética brasileira. **Revista Conjuntura Econômica**, V. 76, N. 04, p. 36–39, 2022. Citado na p. 13.
- DIONIZIO, A. F.; VALE, A. T. do; OLIVEIRA MOREIRA, A. C. de; GALVÃO, L. G. O.; CHAVES, B. S.; ALMEIDA COSTA, M. de. "Agregação de valor a resíduos agroindustriais para fins energéticos. **Revista de Ciências Agrárias**, V. 42, N. 2, p. 528–538, 2019. Citado na p. 47.
- ECO-RESPONSE. **Qual o destino dos resíduos de construção civil?** 2020. Disponível em: <<https://www.ecoresponse.com.br/blog/noticia-interna/residuos-construcao-civil-170>>. Acesso em: 23 ago. 2022. Citado nas pp. 22, 23.
- EDO, M.; SKOGLUND, N.; GAO, Q.; PERSSON, P.-E.; JANSSON, S. Fate of metals and emissions of organic pollutants from torrefaction of waste wood, MSW, and RDF. **Waste Management**, Elsevier, V. 68, p. 646–652, 2017. Citado na p. 24.
- EPE. **Relatório Anual Integrado 2021**. 2022. P. 8. <https://www.epe.gov.br/pt/transparencia-e-prestacao-de-contas/relatorio-anual-integrado>. Citado na p. 18.
- FAN, Y.; TIPPAYAWONG, N.; WEI, G.; HUANG, Z.; ZHAO, K.; JIANG, L.; ZHENG, A.; ZHAO, Z.; LI, H. Minimizing tar formation whilst enhancing syngas production by integrating biomass torrefaction pretreatment with chemical looping gasification. **Applied Energy**, Elsevier, V. 260, p. 114315, 2020. Citado na p. 34.
- FARIA, V. Brasil pode reciclar 98% dos resíduos da construção civil, mas só consegue dar conta de 21%. *Gazeta do povo*, 2019. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/haus/sustentabilidade/brasil-pode-reciclar-98-dos-residuos-da-construcao-civil-mas-so-consegue-dar-conta-de-21/>>. Acesso em: 28 ago. 2022. Citado na p. 22.
- GALLETTI, A. M. R.; ANTONETTI, C. Biomass pre-treatment: separation of cellulose, hemicellulose and lignin. Existing technologies and perspectives. **From Biomass to Chemicals and Fuels**, p. 101, 2013. Citado na p. 26.
- GALVÃO, L. G. O. Efeitos da acústica e da temperatura no processo de torrefação e nas propriedades energéticas da madeira de *Eucalyptus grandis*, 2018. Citado na p. 48.
- GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. d. Teoria da carbonização da madeira. **Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte: CETEC**, V. 1, p. 27–42, 1980. Citado na p. 28.
- GUSMÃO, A. D. XI-020-Potencial energético dos resíduos de biomassa oriundos da construção civil através da gaseificação., 2015. Citado nas pp. 47, 60.

- HENNE, R. **Caracterização da formação e da composição das cinzas e dos problemas associados à combustão da biomassa florestal em caldeira**. 2018. Tese (Doutorado) – Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)—Centro de Ciências Agro ... Citado na p. 28.
- HINRICH, R. A.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente**. Cengage Learning Editores, 2003. Citado na p. 13.
- IEA. **A 10-Point Plan to Reduce the European Union’s Reliance on Russian Natural Gas, IEA, Paris**. 2022a. <https://www.iea.org/reports/a-10-point-plan-to-reduce-the-european-unions-reliance-on-russian-natural-gas>. Citado na p. 18.
- IEA. **Countries and regions**. 2022b. <https://www.iea.org/countries>. Citado na p. 18.
- IEA. **Key World Energy Statistics 2021, IEA**. 2021. [urlhttps://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021](https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021). Citado na p. 18.
- IROBA, K. L.; BAIK, O.-D.; TABIL, L. G. Torrefaction of biomass from municipal solid waste fractions I: temperature profiles, moisture content, energy consumption, mass yield, and thermochemical properties. **Biomass and Bioenergy**, Elsevier, V. 105, p. 320–330, 2017. Citado na p. 48.
- IVANOVSKI, M.; GORICANEC, D.; KROPE, J.; URBANCL, D. Torrefaction pretreatment of lignocellulosic biomass for sustainable solid biofuel production. **Energy**, Elsevier, V. 240, p. 122483, 2022. Citado na p. 14.
- KANWAL, S.; CHAUDHRY, N.; MUNIR, S.; SANA, H. Effect of torrefaction conditions on the physicochemical characterization of agricultural waste (sugarcane bagasse). **Waste Management**, Elsevier, V. 88, p. 280–290, 2019. Citado na p. 32.
- KENNEY, W.; SENNERBY-FORSSE, L.; LAYTON, P. A review of biomass quality research relevant to the use of poplar and willow for energy conversion. **Biomass**, V. 21, N. 3, p. 163–188, 1990. ISSN 0144-4565. DOI: [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(90\)90063-P](https://doi.org/10.1016/0144-4565(90)90063-P). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/014445659090063P>>. Citado na p. 28.
- KLAFKE, A. F. Torrefação de resíduos da indústria de papel e celulose como pré-tratamento para produção de bio-óleo via pirólise rápida, 2018. Citado na p. 29.
- LAPA, K. R.; CONTRERA, R. C.; GARBOSSA, L. H. P.; BÓRIA, J.; SCHALCH, V.; SOUZA, M. P. de. Impactos ambientais relacionados com a geração de gás metano por fontes antropogênicas-destaque para aterros sanitários. In: CONGRESSO Brasileiro De Ciência E Tecnologia Em Resíduos E Desenvolvimento Sustentável. 2004. V. 1, p. 3–4. Citado na p. 60.
- LOPES, F. P.; PEREIRA, P. M.; HAMAYA, R. M. **Análise da contaminação em resíduos de madeira na construção civil**. 2013. B.S. thesis – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Citado nas pp. 14, 24.

- MACÊDO, L. A. D. Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis do processo de torrefação, 2012. Citado nas pp. 25, 27.
- MAESTRELLO, C. C. Reaproveitamento De Resíduos De Madeira Da Construção Civil Para Geração De Energia–revisão. **CONSTRUINDO**, V. 13, N. 2, 2021. Citado nas pp. 15, 20, 24, 25.
- MAHDAVI, M.; SCHMITT, K.; RAMOS, R. A. V.; ALHELOU, H. H. Role of hydrocarbons and renewable energies in Iran’s energy matrix focusing on bioenergy. **IET Renewable Power Generation**, Wiley Online Library, 2022. Citado na p. 19.
- MAMVURA, T. A.; DANHA, G. Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. **Heliyon**, Elsevier, V. 6, N. 3, e03531, 2020. Citado nas pp. 26, 27, 33, 34, 51.
- MANSUR, A. I. **Apesar da crise, construção civil mantém fôlego no DF**. Correio Braziliense, 2022a. Disponível em: <<https://www.correiobraziliense.com.br/cidades-df/2022/02/4982790-apesar-da-crise-construcao-civil-mantem-folego-no-df.html>>. Acesso em: 24 ago. 2022. Citado na p. 20.
- MANSUR, A. I. **DF deve ganhar 18 bairros em 2022, diz Secretaria de Desenvolvimento**. Correio Braziliense, 2022b. Disponível em: <<https://www.correiobraziliense.com.br/cidades-df/2022/02/4984840-df-deve-ganhar-18-bairros-em-2022-diz-secretaria-de-desenvolvimento.html>>. Acesso em: 24 ago. 2022. Citado na p. 20.
- MARTINS, L. **Soluções Sustentáveis Martins Ambiental**. Martins Locações, 2020. Disponível em: <<https://www.locacoesmartins.com.br/cavaco-de-madeira-biomassa-brasilia-df/>>. Acesso em: 24 ago. 2022. Citado na p. 15.
- MEHMOOD, T.; AHMED, A.; AHMAD, A.; AHMAD, M. S.; SANDHU, M. A. Optimization of mixed surfactants-based β -carotene nanoemulsions using response surface methodology: an ultrasonic homogenization approach. **Food chemistry**, Elsevier, V. 253, p. 179–184, 2018. Citado na p. 45.
- MENDONÇA, L. A. Desempenho do delineamento composto central em experimentos com alto coeficiente de variação. Universidade Federal de Viçosa, 2012. Citado nas pp. 35, 37.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Grupo GEN, 2021. 7ª edição. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637448/>>. Acesso em: 23 abr. 2022. Citado nas pp. 34–37.

- NANDA, S.; DALAI, A. K.; BERRUTI, F.; KOZINSKI, J. A. Biochar as an exceptional bioresource for energy, agronomy, carbon sequestration, activated carbon and specialty materials. **Waste and Biomass Valorization**, Springer, V. 7, N. 2, p. 201–235, 2016. Citado na p. 29.
- NANDHINI, R.; BERSLIN, D.; SIVAPRAKASH, B.; RAJAMOHAN, N.; VO, D.-V. N. Thermochemical conversion of municipal solid waste into energy and hydrogen: a review. **Environmental Chemistry Letters**, Springer, p. 1–25, 2022. Citado nas pp. 14, 29, 30.
- NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como Fazer Experimentos:- Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. Bookman Editora, 2001. Citado nas pp. 36, 37.
- NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como Fazer Experimentos:- Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. Bookman Editora, 2010. Citado nas pp. 35–37.
- NHUCHHEN, D. R.; BASU, P.; ACHARYA, B. A comprehensive review on biomass torrefaction. **Int. J. Renew. Energy Biofuels**, V. 2014, p. 1–56, 2014. Citado nas pp. 26, 29, 49.
- OKOLIE, J. A.; NANDA, S.; DALAI, A. K.; KOZINSKI, J. A. Chemistry and specialty industrial applications of lignocellulosic biomass. **Waste and Biomass Valorization**, Springer, V. 12, N. 5, p. 2145–2169, 2021. Citado nas pp. 13, 30.
- OLIVEIRA, F. d. A.; MAUÉS, L. M. F.; ROSA, C. C. N.; SANTOS, D. G.; SEIXAS, R. d. M. Previsão da geração de resíduos na construção civil por meio da modelagem BIM. **Ambiente Construído**, SciELO Brasil, V. 20, p. 157–176, 2020. Citado na p. 13.
- OLIVEIRA, J. A. de. **Life Cycle Engineering and Management of Products: Theory and Practice**. Springer Nature, 2021. Citado na p. 60.
- OLIVEIRA, L. H.; BARBOSA, P. V. G.; LIMA, P. A. F.; YAMAJI, F. M.; JÚNIOR, C. R. S. Aproveitamento de resíduos madeireiros de Pinus sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes. **Revista de Ciências Agrárias**, V. 40, N. 3, p. 683–691, 2017. Citado na p. 48.
- OMACHI, I. H.; RODRIGUES, L. G.; STOLF, M.; CANNAVAL, R.; SOBREIRO, R. Produção de biomassa florestal para exportação: o caso da Amcel. **Biomassa & Energia**, V. 1, N. 1, p. 29–36, 2004. Citado na p. 25.
- ONU-BR. **Energia renovável pode tirar o mundo da crise climática, diz Guterres**. Nações Unidas no Brasil, 2022. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/182478-energia-renovavel-pode-tirar-o-mundo-da-crise-climatica-diz-guterres>>. Acesso em: 23 ago. 2022. Citado nas pp. 13, 18.

- ORANG, N.; TRAN, H. Effect of feedstock moisture content on biomass boiler operation. **Tappi J**, V. 14, N. 10, p. 629–637, 2015. Citado na p. 29.
- PALANIVELU, K.; RAMACHANDRAN, A.; RAGHAVAN, V. et al. Biochar from biomass waste as a renewable carbon material for climate change mitigation in reducing greenhouse gas emissions—a review. **Biomass Conversion and Biorefinery**, Springer, V. 11, N. 5, p. 2247–2267, 2021. Citado na p. 25.
- PASCHOALIN, J. A. **Setor da construção e a geração de resíduos: a necessidade de discussão de um novo paradigma**. 2017. Disponível em: <<http://socioambientalonline.com.br/sector-da-construcao-e-a-geracao-de-residuos-a-necessidade-de-discussao-de-um-novo-paradigma/>>. Acesso em: 24 ago. 2022. Citado na p. 23.
- PEÉREZ, L. A.; SEGURA, C.; BUSTAMANTE-GARCÍA, V.; CÁPIRO, O. G.; JIMÉNEZ, R. Torrefaction of wood and bark from *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*: Focus on volatile evolution vs feasible temperatures. **Energy**, Elsevier, V. 93, p. 1731–1741, 2015. Citado nas pp. 28, 51.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. Estruturas de madeira. **Rio de Janeiro**, V. 6, 2003. Citado nas pp. 19, 26, 47.
- PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. Torrefaction of wood: Part 2. Analysis of products. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, V. 77, N. 1, p. 35–40, 2006. ISSN 0165-2370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.01.001>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237006000167>>. Citado nas pp. 29, 34, 51.
- QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais Brasília, Brazil, 2002. Citado na p. 19.
- ROQUE, R. A. L.; PIERRI, A. C. Uso inteligente de recursos naturais e sustentabilidade na construção civil. **Research, society and development**, V. 8, N. 2, e3482703–e3482703, 2019. Citado na p. 20.
- ROUSSET, P.; AGUIAR, C.; LABBÉ, N.; COMMANDRÉ, J.-M. Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction. **Bioresource Technology**, Elsevier, V. 102, N. 17, p. 8225–8231, 2011. Citado na p. 44.
- ROUSSET, P.; RODRIGUES, T. O. Torrefação como pré-condicionamento da biomassa para uso energético: estado da arte. In. Citado na p. 34.
- SADDAWI, A.; JONES, J. M.; WILLIAMS, A.; LE COEUR, C. Commodity Fuels from Biomass through Pretreatment and Torrefaction: Effects of Mineral Content on Torrefied Fuel Characteristics and Quality. **Energy & Fuels**, V. 26, N. 11, p. 6466–6474, 2012. DOI: 10.1021/ef2016649. eprint: <https://doi.org/10.1021/>

- ef2016649. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ef2016649>>. Citado nas pp. 14, 29.
- SANTOS, G. P. dos. Metodologia de superfície de resposta aplicada à secagem de frutos de macaúba para obtenção de óleo de polpa de alta qualidade. **Embrapa Agroenergia-Tese/dissertação (ALICE)**, f. 65, 2014., 2014. Citado na p. 38.
- SARKER, T. R.; NANDA, S.; DALAI, A. K.; MEDA, V. A review of torrefaction technology for upgrading lignocellulosic biomass to solid biofuels. **BioEnergy Research**, Springer, V. 14, N. 2, p. 645–669, 2021. Citado nas pp. 31, 32, 34.
- SHALINI, S. S.; PALANIVELU, K.; RAMACHANDR, A.; RAGHAVAN, V. Biochar from biomass waste as a renewable carbon material for climate change mitigation in reducing greenhouse gas emissions - a review. *Biomass Conversion e Biorefinery*, 2020. Citado na p. 25.
- SILVA, G. S. da; SILVA, N. E. G.; OLIVEIRA SILVA, S. M. G. de; DO NASCIMENTO, F. B. C. RESÍDUOS DE MADEIRA PRODUZIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS**, V. 3, N. 3, p. 207–207, 2016. Citado nas pp. 24, 25.
- SILVA, L.; OLIVEIRA, L.; SILVA, H.; SOUSA, P.; BARROS, D. Aproveitamento energético de resíduos da indústria moveleira. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, V. 5, N. 2, p. 36–42, 2018. Citado na p. 19.
- SILVA, S. P. D.; COSTA, A. S. V. D.; DOS SANTOS, S. L. B.; DE LAIA, M. L. A Importância da Biomassa na Matriz Energética Brasileira. **Pensar Acadêmico**, V. 19, N. 2, p. 557–583, 2021. Citado na p. 25.
- SILVEIRA, E. **Acoustic field influence in the kinetics of thermochemical degradation during biomass torrefaction**. Mai. 2018. Theses – Université de Lorraine ; Universidade de Brasília. Disponível em: <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01886056>>. Citado na p. 28.
- SILVEIRA, E. A.; SANTANNA, M. S.; BARBOSA SOUTO, N. P.; LAMAS, G. C.; GALVÃO, L. G. O.; LUZ, S. M.; CALDEIRA-PIRES, A. Urban lignocellulosic waste as biofuel: thermal improvement and torrefaction kinetics. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Springer, p. 1–16, 2022. Citado na p. 14.
- SILVEIRA, E. A.; GALVÃO, L. G. O.; SÁ, I. A.; SILVA, B. F.; MACEDO, L.; ROUSSET, P.; PIRES, A. C. Effect of torrefaction on thermal behavior and fuel properties of *Eucalyptus grandis* macro-particulates. **Journal of Academic Works in Science**, 2019. Citado na p. 43.

- SILVEIRA, E. A. **Tecnologias de conversão de biomassa, Reunião 21/10/2020 - Lab. Virtual 01**. 2020. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=W89UPoP2XC8&list=PL3D7s4CrNq18s3pV5Ks0gLGTiWgjvygab&index=13>>. Acesso em: 23 ago. 2022. Citado nas pp. 31, 32.
- SINGH, S.; CHAKRABORTY, J. P.; MONDAL, M. K. Optimization of process parameters for torrefaction of *Acacia nilotica* using response surface methodology and characteristics of torrefied biomass as upgraded fuel. **Energy**, Elsevier, V. 186, p. 115865, 2019. Citado na p. 45.
- SLU, S. d. L. U. **Ampliação da coleta seletiva e impactos da pandemia nos serviços de limpeza urbana, Relatório Anual 2020**. 2021. P. 57. Disponível em: <<https://www.slu.df.gov.br/wp-content/uploads/2021/03/RELATORIO-ANUAL-2020.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2022. Citado na p. 23.
- SLU, S. d. L. U. **Relatório Anual 2021**. 2022. P. 57. Disponível em: <<https://www.slu.df.gov.br/wp-content/uploads/2022/02/Relatorio-ANUAL.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2022. Citado na p. 23.
- SON, H.; KIM, C.; CHONG, W. K.; CHOU, J.-S. Implementing sustainable development in the construction industry: constructors' perspectives in the US and Korea. **Sustainable Development**, Wiley Online Library, V. 19, N. 5, p. 337–347, 2011. Citado na p. 20.
- STREZOV, V.; EVANS, T. J. **Biomass Processing Technologies**. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. Citado na p. 29.
- TEREZO, R. F.; SZÜCS, C. A.; VALLE, Â. do; SAMPAIO, C. A. d. P.; STÜPP, Â. M. Propriedades da madeira de paricá em diferentes idades para uso estrutural. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, V. 6, N. 3, 2015. Citado na p. 19.
- TIMMONS, D. M.; VITERI, C. Biomass energy from wood chips: Diesel fuel dependence? **Biomass and Bioenergy**, Elsevier, V. 34, N. 9, p. 1419–1425, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.010>. Citado na p. 26.
- TSIMPLIARAKI, A.; SVINTERIKOS, S.; ZUBURTUKUDIS, I.; MARRAS, S.; PANAYIOTOU, C. Nanofibrous Structure of Nonwoven Mats of Electrospun Biodegradable Polymer Nanocomposites-A Design of Experiments (DoE) Study. **Industrial & engineering chemistry research**, ACS Publications, V. 48, N. 9, p. 4365–4374, 2009. Citado na p. 35.
- VITAL, B. R.; ANDRADE, A. d.; VALENTE, O. F.; CAMPOS, J. C. C. Influência da casca no rendimento e na qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, V. 41, N. 42, p. 44–9, 1989. Citado na p. 48.

-
- WANG, S.; DAI, G.; YANG, H.; LUO, Z. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: a state-of-the-art review. **Progress in energy and combustion science**, Elsevier, V. 62, p. 33–86, 2017. Citado na p. 26.
- WIJITKOSUM, S. Biochar derived from agricultural wastes and wood residues for sustainable agricultural and environmental applications. **International Soil and Water Conservation Research**, Elsevier, V. 10, N. 2, p. 335–341, 2022. Citado na p. 25.
- WYMAN, C.; DECKER, S.; HIMMEL, M.; BRADY, J.; SKOPEC, C.; VIKARI, L. Polysaccharides: structural diversity and functional versatility. **Dekker, New York**, p. 995–1033, 2005. Citado na p. 26.
- YOKOYAMA, S.; MATSUMURA, Y. **The Asian biomass handbook: a guide for biomass production and utilization. Thermochemical conversion of biomass, 1st (Ed) part, 4, 71**. 2008. Citado na p. 25.
- ZABED, H.; SAHU, J.; SUELY, A.; BOYCE, A.; FARUQ, G. Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, V. 71, p. 475–501, 2017. Citado nas pp. 18, 19, 25.
- ZENID, J. G. Madeira na construção civil. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo**, 2011. Citado nas pp. 16, 24.
- ZOGLHAMI, A.; PAËS, G. Lignocellulosic Biomass: Understanding Recalcitrance and Predicting Hydrolysis. **Frontiers in Chemistry**, V. 7, 2019. ISSN 2296-2646. DOI: 10.3389/fchem.2019.00874. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fchem.2019.00874>>. Citado na p. 25.