

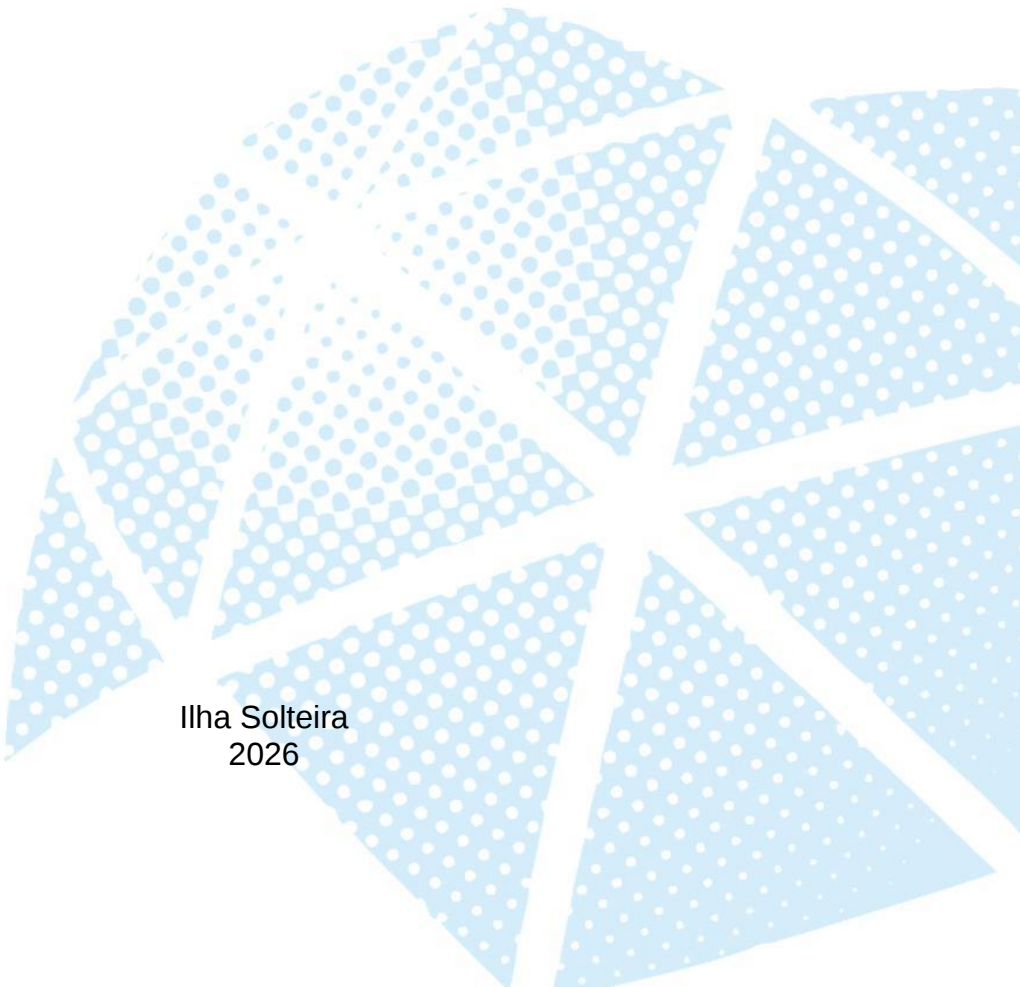
RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto
completo desta dissertação será
disponibilizado somente a partir de
14/01/2027

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

JOÃO GABRIEL MARINI DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEL SÓLIDO DE ALTO DESEMPENHO A
PARTIR DE BIOCARVÃO**



Ilha Solteira
2026

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

JOÃO GABRIEL MARINI DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEL SÓLIDO DE ALTO
DESEMPENHO A PARTIR DE BIOCARVÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
UNESP como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Ciência dos
Materiais.

Prof. Dr. Michael Jones da Silva
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586d Silva, João Gabriel Marini da.
Desenvolvimento de combustível sólido de alto desempenho a partir de biocarvão / João Gabriel Marini da Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
142 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira. Área de conhecimento: Processos Termoquímicos, 2026

Orientador: Michael Jones da Silva

Inclui bibliografia

1. Biocarvão. 2. Pirólise. 3. Briquetes. 4. Biomassa residual. 5. Tocos e raízes de eucalipto.

Impacto potencial desta pesquisa

Esta pesquisa promove energia limpa e inovação ao desenvolver biocombustível sólido de biocarvão de eucalipto, alinhado a vários ODS da ONU. Contribui para descarbonização, transição energética e economia circular, com impactos científicos, sociais, econômicos e educacionais, além de fortalecer a sua inserção nos cenários local a internacional.

Potential impact of this research

This research promotes clean energy and innovation by developing a high-performance solid biofuel based on eucalyptus biochar, aligned with several ONU SDGs. It contributes to decarbonization, energy transition, and the circular economy, generating scientific, social, economic, and educational impacts, while strengthening its presence from local to international contexts.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: **Desenvolvimento de combustível sólido de alto desempenho a partir do biocarvão**

AUTOR: JOÃO GABRIEL MARINI DA SILVA

ORIENTADOR: MICHAEL JONES DA SILVA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência dos Materiais, área: Ciência e Engenharia dos Materiais pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MICHAEL JONES DA SILVA**
Data: 21/07/2026 09:28:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. MICHAEL JONES DA SILVA (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia / UNESP / Câmpus de Rosana - FEC

Documento assinado digitalmente
 **MARIA CLAUDIA COSTA DE OLIVEIRA BOTAN**
Data: 21/07/2026 08:30:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. MARIA CLAUDIA COSTA DE OLIVEIRA BOTAN (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia / UNESP / Câmpus de Rosana - FEC

Documento assinado digitalmente
 **DANIELLE GOVEIA**
Data: 20/07/2026 15:36:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. DANIELLE GOVEIA (Participação Virtual)
Departamento de Ciências e Tecnologia / UNESP / Câmpus de Itapeva - ICE

Ilha Solteira, 14 de julho de 2026.

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais João Carlos e Sônia, que me ensinaram o valor do estudo, da perseverança e da honestidade.

À minha amada esposa Thaís, pela paciência e apoio incondicional de sempre.

Aos meus filhos Maria Clara, Matheus Henrique e João Pedro, que são a minha inspiração.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo gostaria de agradecer a Deus pela vida e oportunidade de estar finalizando este trabalho.

Meus mais sinceros agradecimentos ao meu orientador Prof. Dr. Michael Jones da Silva, por ter aceitado o desafio de me guiar neste trabalho, sendo fundamental para que chegasse ao objetivo.

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, em especial o Campus de Ilha Solteira, pela oportunidade do curso e toda a estrutura que ficou a disposição, assim como a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais que transmitiram conhecimento que contribuíram para minha formação ao longo desta trajetória.

Ao Instituto SENAI de Inovação em Biomassa que gerou a busca pela conhecimento e proporcionou todo o ambiente para que pudesse executar o trabalho, extendendo a todos os colaboradores que de forma direta ou indireta participaram das atividades do projeto e aqui gostaria de fazer um agradecimento especial ao Dr. Luciano Varanda que compartilhou sua experiência nas análises de resultados e planejamento experimental.

A empresa Eldorado Brasil Celulose S.A., em especial ao Francisco Mattiazzo, pela parceria e incentivo a ciência, sempre buscando soluções inovadoras e sustentáveis como no projeto Forest4Fuel do qual este trabalho faz parte.

A FUNDECT - Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado do Mato Grosso do Sul, que financiou um projeto maior do qual este trabalho faz parte.

A minha família pelo apoio, incentivo e companheirismo, que tornaram esta jornada mais leve e enriquecedora.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, seja com apoio, incentivo, sugestões ou palavras de motivação, registro aqui minha sincera gratidão.

Muito obrigado!

“Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo está vendo e pensar uma coisa diferente”.

Roger Von Oech

RESUMO

Este estudo tem como objetivo desenvolver um biocombustível sólido de alto desempenho a partir de biocarvão obtido da pirólise de biomassa residual de tocos e raízes de eucalipto, contribuindo para a transição energética, a descarbonização industrial e o aproveitamento sustentável de resíduos lignocelulósicos. Inicialmente, realizou-se a caracterização físico-química da biomassa, incluindo análise química dos macroconstituintes, análise imediata, análise elementar (CHNS-O), poder calorífico e análises térmicas (TGA/dTG). O processo de pirólise foi conduzido com base em delineamento composto central rotacional (DCCR), que originou nove amostras, variando-se temperatura e tempo de residência para maximizar a produção de biocarvão e bio-óleo pesado. A melhor amostra de pirólise, a 400 °C e 90 min, produziu um biocarvão com carbono fixo de $72,54 \pm 0,20$ % e PCS de $7.595,60 \pm 45,41$ kcal/kg. Após a seleção das melhores condições de pirólise em escala laboratorial, a produção foi ampliada para escala piloto em forno rotativo. O biocarvão obtido foi utilizado na produção de briquetes, empregando bio-óleo pesado e amido de fécula de mandioca como ligantes. A briquetagem também foi otimizada por planejamento experimental, avaliando-se teor de amido, teor de bio-óleo pesado e pressão de prensagem. Os briquetes foram caracterizados quanto às propriedades mecânicas, energéticas e físicas. A análise estatística dos resultados foi realizada por meio de ANOVA, permitindo a construção de modelos matemáticos e superfícies de resposta para definição das condições ótimas de produção. As formulações otimizadas foram validadas experimentalmente, onde a amostra C foi a melhor, apresentando carbono fixo de $47,01 \pm 0,40$ % e PCS de $6.108,84 \pm 71,31$ kcal/kg, demonstrando desempenho satisfatório como biocombustível sólido. Este estudo evidencia a viabilidade técnica do uso de tocos e raízes de eucalipto na produção de biocombustível sólido de elevado desempenho energético, contribuindo para a descarbonização industrial e a consolidação da bioeconomia e da economia circular.

Palavras-chave: : biocarvão; pirólise; briquetes; biomassa residual; tocos e raízes de eucalipto.

ABSTRACT

This study aims to develop a high-performance solid biofuel from biochar obtained through the pyrolysis of residual eucalyptus stump and root biomass, contributing to energy transition, industrial decarbonization, and the sustainable use of lignocellulosic residues. Initially, the physicochemical characterization of the biomass was carried out, including chemical analysis of macro-constituents, proximate analysis, ultimate analysis (CHNS-O), higher heating value (HHV), and thermal analyses (TGA/dTG). The pyrolysis process was conducted based on a central composite rotational design (CCRD), resulting in nine samples, in which temperature and residence time were varied to maximize biochar and heavy bio-oil production. The best sample of pyrolysis, at 400 °C and 90 min, produced a biochar with fixed carbon content of $72.54 \pm 0.20\%$ and HHV of $7,595.60 \pm 45.41$ kcal/kg. After selecting the optimal laboratory-scale pyrolysis conditions, production was scaled up to pilot scale using a rotary kiln. The obtained biochar was used to produce briquettes, employing heavy bio-oil and cassava starch as binders. The briquetting process was also optimized through experimental design, evaluating starch content, heavy bio-oil content, and pressing pressure. The briquettes were characterized in terms of mechanical, energetic, and physical properties. Statistical analysis of the results was performed using ANOVA, enabling the development of mathematical models and response surfaces to define optimal production conditions. The optimized formulations were experimentally validated, and sample C showed the best performance, presenting fixed carbon of $47.01 \pm 0.40\%$ and HHV of $6,108.84 \pm 71.31$ kcal/kg, demonstrating satisfactory performance as a solid biofuel. This study demonstrates the technical feasibility of using eucalyptus stumps and roots in the production of high-performance solid biofuel, contributing to industrial decarbonization and the consolidation of the bioeconomy and the circular economy.

Keywords: biochar; pyrolysis; briquettes; residual biomass; eucalyptus stumps and roots.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação das fontes de energia na geração de energia elétrica brasileira.....	25
Figura 2 - Histórico de área plantada no Brasil por espécie, no período de 2015 a 2024, em milhões de hectares.....	27
Figura 3 - Cavacos da biomassa tocos e raízes de eucalipto: (a) recebidos e (b) em secagem ao ar livre.	38
Figura 4 - Analisador elementar utilizado.	46
Figura 5 - Bomba calorimétrica utilizada.	48
Figura 6 - Analisador térmico simultâneo utilizado.	49
Figura 7 - Equipamentos utilizados para adequar a granulometria da biomassa: (a) moinho forrageiro e (b) agitador eletromagnético de peneiras...	50
Figura 8 - Sistema de volatilização de materiais, modelo SIVOMO-250.	51
Figura 9 - Processo de pirólise em escala piloto: (a) forno rotativo utilizado e (b) biocarvão sendo coletado do forno.....	55
Figura 10 - a) Pesagem do biocarvão; b) adição do BOP; c) adição do amido gelatinizado; (d) formulações prontas para briquetagem.....	59
Figura 11 - a) Briquetadeira LIPPEL LB-32; b) molde cilíndrico e prensa.	61
Figura 12 - Sequência do processo de briquetagem laboratorial.	62
Figura 13 - Briquetes dispostos em seus respectivos béqueres, com cura em: a) temperatura ambiente durante 7 dias e, b) em estufa a temperatura de 70°C durante 7 dias.....	63
Figura 14 - Briquete produzido - amostra 17.	64
Figura 15 - a) Lixamento longitudinal dos briquetes para nivelar o contato com o equipamento; b) Medição do comprimento e do diâmetro dos briquetes.....	65
Figura 16 - Posição do corpo de prova durante o ensaio.	66

Figura 17 - Colapso do corpo de prova após a ruptura.	66
Figura 18 - Teste de queda: a) briquete no saquinho zip lock na altura de 1m, b) briquete solto da altura de 1 m.	67
Figura 19 - Equipamento utilizado no teste de tamboramento.	68
Figura 20 - Análises térmicas da biomassa tocos e raízes de eucalipto: (a) curva termogravimétrica da biomassa - TGA; e (b) primeira derivada da curva termogravimétrica da biomassa – dTG.	77
Figura 21 - Análises térmicas do biocarvão da amostra 8: (a) curva termogravimétrica – TGA; e (b) primeira derivada da curva termogravimétrica – dTG.	85
Figura 22 - Diagrama de Pareto para a variável resposta RCD.	95
Figura 23 - Gráfico de superfície para a variável resposta RCD: ligante bio-óleo (%) versus pressão de prensagem (bar).	96
Figura 24 - Gráfico de contorno para a variável resposta RCD: ligante bio-óleo (%) versus pressão de prensagem (bar).	97
Figura 25 - Gráfico de contorno para a variável resposta RCD: ligante amido (g) versus pressão de prensagem (bar).	97
Figura 26 - Gráfico de contorno para a variável resposta RCD: ligante amido (g) versus ligante bio-óleo (%).	98
Figura 27 - Briquetes após o teste de tamboramento da réplica 01: a) briquetes na peneira de 25 mm e no fundo - finos; b) os 10 briquetes após o tamboramento c) imagem de um briquete, com desgastes nas extremidades do “cilindro”.	103
Figura 28 - Perfil térmico do briquete otimizado – amostra A.	107
Figura 29 - Perfil térmico do briquete otimizado – amostra B.	108
Figura 30 - Perfil térmico do briquete otimizado – amostra C.	109
Figura 31 - Diagrama de Pareto para a variável resposta PCS.	125

Figura 32 - Gráfico de contorno para a variável resposta PCS: ligante bio-óleo (%) versus pressão de prensagem (bar).	126
Figura 33 - Gráfico de contorno para a variável resposta PCS: ligante amido (g) versus pressão de prensagem (bar).	126
Figura 34 - Gráfico de contorno para a variável resposta PCS: ligante amido (g) versus ligante bio-óleo (%).	127
Figura 35 - Diagrama de Pareto para variável resposta densidade.	128
Figura 36 - Gráfico de superfície para a variável resposta densidade: ligante bio-óleo (%) versus pressão de prensagem (bar).	128
Figura 37 - Gráfico de superfície para a variável resposta densidade: ligante amido (g) versus pressão de prensagem (bar).	129
Figura 38 - Gráfico de superfície para a variável resposta densidade: ligante amido (g) versus ligante bio-óleo (%).	129
Figura 39 - Diagrama de Pareto para variável resposta Umidade.	130
Figura 40 - Gráfico de superfície para variável resposta umidade: ligante bio-óleo (%) versus pressão de prensagem (bar).	131
Figura 41 - Gráfico de superfície para variável resposta umidade: ligante amido (g) versus pressão de prensagem (bar).	131
Figura 42 - Gráfico de superfície para variável resposta umidade: ligante amido (g) versus ligante bio-óleo (%).	132
Figura 43 - Diagrama de Pareto para variável resposta voláteis.	133
Figura 44 - Gráfico de superfície para variável resposta voláteis: ligante bio-óleo (%) versus pressão de prensagem (bar).	133
Figura 45 - Gráfico de superfície para variável resposta voláteis: ligante amido (g) versus pressão de prensagem (bar).	134
Figura 46 - Gráfico de superfície para variável resposta voláteis: ligante amido (g) versus ligante bio-óleo (%).	134
Figura 47 - Diagrama de Pareto para variável resposta Cinzas.	135

Figura 48 - Gráfico de superfície para variável resposta cinzas: ligante bio-óleo (%) versus pressão de prensagem (bar).	136
Figura 49 - Gráfico de superfície para variável resposta cinzas: ligante amido (g) versus pressão de prensagem (bar).	136
Figura 50 - Gráfico de superfície para variável resposta cinzas: ligante amido (g) versus ligante bio-óleo (%).	137
Figura 51 - Diagrama de Pareto para variável carbono fixo.	138
Figura 52 - Gráfico de superfície para variável resposta carbono fixo: ligante bio-óleo (%) versus pressão de prensagem (bar).	138
Figura 53 - Gráfico de superfície para variável resposta carbono fixo: ligante amido (g) versus pressão de prensagem (bar).	139
Figura 54 - Gráfico de superfície para variável resposta carbono fixo: ligante amido (g) versus ligante bio-óleo (%).	139
Figura 55 - Diagrama de Pareto para variável resposta teor de carbono.	140
Figura 56 - Gráfico de superfície para variável resposta teor de carbono: ligante bio-óleo (%) versus pressão de prensagem (bar).	141
Figura 57 - Gráfico de superfície para variável resposta teor de carbono: ligante amido (g) versus pressão de prensagem (bar).	141
Figura 58 - Gráfico de superfície para variável resposta teor de carbono: ligante amido (g) versus ligante bio-óleo (%).	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições para determinação de carboidratos estruturais, celulose e hemicelulose.	41
Tabela 2 - Planejamento experimental com as condições de pirólise: temperatura x tempo de residência.	53
Tabela 3 - Planejamento experimental para os briquetes encolados com dois ligantes juntos.	57
Tabela 4 - Ensaios teoricamente ótimos para validação.....	71
Tabela 5 - Resultados da composição química da biomassa tocos e raízes de eucalipto.	73
Tabela 6 - Resultados da análise imediata da biomassa de tocos e raízes de eucalipto.	74
Tabela 7 - Resultados da análise elementar (CHNS-O) da biomassa tocos e raízes de eucalipto.	75
Tabela 8 - Resultados do poder calorífico da biomassa tocos e raízes de eucalipto.	76
Tabela 9 - Resultados dos testes de pirólise realizados.	79
Tabela 10 - Resultado da análise imediata da amostra de biocarvão da amostra 8.	82
Tabela 11 - Resultados da análise elementar (CHNS-O) do biocarvão da amostra 8.	83
Tabela 12 - Resultados da análise de poder calorífico da amostra de biocarvão da amostra 8.	84
Tabela 13 - Tensão a compressão diametral dos briquetes do delineamento experimental.	86
Tabela 14 - Resultados da análise imediata dos briquetes do delineamento experimental.	87
Tabela 15 - Teores de CNHOS dos briquetes do delineamento experimental.	89
Tabela 16 - Resultados do PCS e do PCI dos briquetes do delineamento experimental.	91

Tabela 17 - Resultados da densidade aparente dos briquetes do delineamento experimental.....	93
Tabela 18 - Resultados do R2 da ANOVA para cada variável resposta avaliada.	99
Tabela 19 - Tensão a compressão diametral dos briquetes otimizados.	101
Tabela 20 - Teste de queda dos briquetes otimizados.	101
Tabela 21 - Teste de tamboramento dos briquetes da amostra C.	102
Tabela 22 - Análise imediata dos briquetes otimizados.	104
Tabela 23 - Teores de CNHS e O dos briquetes otimizados.	105
Tabela 24 - PCS e PCI dos briquetes otimizados.	106
Tabela 25 - Densidade aparente dos briquetes otimizados.	110
Tabela 26 - Validação do briquete otimizado – amostra A.....	111
Tabela 27 - Validação do briquete otimizado – amostra B.....	112
Tabela 28 - Validação do briquete otimizado – amostra C.	112

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 OBJETIVO GERAL	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA	23
2.2 BIOMASSA RESIDUAL FLORESTAL DE EUCALIPTO	26
2.3 CONVERSÃO TERMOQUÍMICA DA BIOMASSA	29
2.4 BIOCARVÃO: PROPRIEDADES E APLICAÇÕES ENERGÉTICAS	31
2.5 BRIQUETAGEM E DENSIFICAÇÃO ENERGÉTICA	32
2.6 POSSÍVEIS APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS PARA BRIQUETES	33
2.7 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS	35
 3 METODOLOGIA	36
3.1 ACONDICIONAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA TOCOS E RAÍZES DE EUCALIPTO	36
3.1.1 Biomassa tocos e raízes de eucalipto	37
3.1.2 Caracterização química dos macroconstituintes	38
3.1.2.1 Teor de extrativos	38
3.1.2.2 Teor de ligninas totais.....	39
3.1.2.3 Teor de celulose e hemicelulose	40
3.1.3 Análise imediata.....	43
3.1.3.1 Teor de umidade.....	43
3.1.3.2 Teor de materiais voláteis.....	44
3.1.3.3 Teor de cinzas	44
3.1.3.4 Teor de carbono fixo.....	45
3.1.4 Análise elementar.....	45
3.1.5 Poder calorífico	47
3.1.5.1 Poder calorífico superior (PCS)	47
3.1.5.2 Poder calorífico inferior (PCI).....	48
3.1.6 Análises térmicas (TGA/dTG)	48
3.2 PROCESSO DE PIRÓLISE – MAXIMIZAÇÃO DAS QUANTIDADES DE BIOCARVÃO E BIO-ÓLEO PRODUZIDAS	49
3.2.1 Preparo da biomassa	49

3.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES – ETAPAS DE OTIMIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS BRIQUETES	55
3.3.1 Produção dos briquetes	58
3.3.2 Processo de cura dos briquetes	63
3.3.3 Caracterização dos briquetes.....	64
3.3.3.1 Caracterização mecânica dos briquetes	64
3.3.3.1.1 Compressão diametral	64
3.3.3.1.2 Teste de queda	67
3.3.3.1.3 Tamboramento	67
3.3.3.2 Caracterização energética dos briquetes	69
3.3.3.3 Caracterização física dos briquetes.....	69
3.3.3.3.1 Densidade aparente dos briquetes.....	69
3.3.4 Otimização dos briquetes em escala laboratorial	70
3.3.5 Validação dos briquetes em escala laboratorial	71
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA TOCOS E RAÍZES DE EUCALIPTO	72
4.1.1 Análise química.....	72
4.1.2 Análise imediata.....	73
4.1.3 Análise elementar (CHNS-O)	74
4.1.4 Poder calorífico	76
4.1.5 Análises térmicas (TGA/dTG)	77
4.2 PROCESSO DE PIRÓLISE – MAXIMIZAÇÃO DAS QUANTIDADES DE BIOCARVÃO E BIO-ÓLEO PESADO PRODUZIDAS.....	78
4.2.1 Escolha das melhores condições de pirólise da biomassa	78
4.2.2 Caracterização energética do biocarvão da amostra 8 – melhor rendimento	81
4.2.2.1 Análise imediata	82
4.2.2.2. Análise elementar (CHNS-O).....	83
4.2.2.4 Poder calorífico.....	84
4.2.2.5 Análises térmicas (TGA/dTG)	85
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES – ETAPAS DE OTIMIZAÇÃO E VALIDAÇÃO EM ESCALA DE LABORATÓRIO	86
4.3.1 Propriedade mecânica - resistência à compressão diametral dos briquetes	86

4.3.2 Caracterização das propriedades energéticas dos briquetes.....	87
4.3.2.1 Análise imediata	87
4.3.2.2 Análise elementar	89
4.3.2.3 Poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI)	91
4.3.3 Propriedade física - densidade aparente dos briquetes	93
4.3.4 Análise de variância ANOVA dos briquetes do delineamento experimental.....	94
4.3.4.1 Variável resposta resistência a compressão diametral.....	94
4.3.4.2 Resultados do R^2 da ANOVA	99
4.3.5 Caracterização dos briquetes otimizados.....	100
4.3.5.1 Caracterização mecânica dos briquetes otimizados	100
4.3.5.1.1 – Resistência a compressão diametral.....	100
4.3.5.1.2 – Teste de queda	101
4.3.5.1.3 – Tamboramento	102
4.3.5.2 Caracterização das propriedades energéticas dos briquetes otimizados	103
4.3.5.2.1 Análise imediata.....	103
4.3.5.2.2 Análise elementar.....	105
4.3.5.2.3 Poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI).....	105
4.3.5.2.4 Análises térmicas de TGA/dTG/DSC	106
4.3.5.3 Propriedade física - densidade aparente	110
4.3.6 Validação dos briquetes otimizados.....	111
4.4 IMPACTOS E POTENCIAIS DE MERCADO DESTA PESQUISA.....	114
4.4.1 Impactos tecnológicos e de inovação.....	115
4.4.2 Impactos ambientais	115
4.4.3 Potencial de mercado.....	116
 5 CONCLUSÃO	 117
 REFERÊNCIAS.....	 118
 APÊNDICE A: ANÁLISE DE VARIÂNCIA - ANOVA	 125

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética mundial, associada às preocupações ambientais decorrentes do uso intensivo de combustíveis fósseis, tem intensificado a busca por fontes renováveis e sustentáveis de energia. O setor energético é responsável por parcela significativa das emissões globais de gases de efeito estufa, evidenciando a urgência da transição para matrizes de baixo carbono. Nesse contexto, a biomassa se destaca como recurso energético renovável e assume papel estratégico, especialmente em países com forte vocação agroindustrial e grande diversidade de biomassas existentes, como o Brasil (Santos, Nascimento, Alves, 2027; Silva *et al.*, 2005; Walter, 2021).

A biomassa lignocelulósica oriunda de resíduos agrícolas, florestais, urbanos e industriais, apresenta ampla disponibilidade e elevado potencial energético. Entretanto, sua utilização direta como combustível sólido é limitada por fatores como baixa densidade energética, alta umidade, heterogeneidade granulométrica e entraves logísticos relacionados ao transporte e armazenamento. Tais desafios impulsionam o desenvolvimento de tecnologias de conversão termoquímica, destacando-se a pirólise para produção de biocarvão, material rico em carbono, com maior poder calorífico, maior estabilidade química e melhores propriedades de combustão em comparação à biomassa *in natura* (Bridgwater, 2012; Lehmann, Joseph, 2009);

O biocarvão, embora apresente estrutura porosa, elevado teor de carbono fixo e menor fração de voláteis - características favoráveis ao uso energético, possui baixa densidade aparente e fragilidade mecânica, o que limita sua aplicação direta em sistemas convencionais. Nesse cenário, a briquetagem surge como alternativa tecnológica eficiente para promover a densificação do material, elevando a densidade energética por unidade de volume, aumentando a resistência mecânica e melhorando o desempenho logístico e operacional. O desenvolvimento de briquetes de biocarvão de alta performance, especialmente a partir de biocarvão de eucalipto, requer uma abordagem integrada sob a ótica da Ciência e Engenharia de Materiais. Torna-se essencial compreender as relações entre composição química e propriedades físico-químicas, mecânicas e térmicas, além de otimizar parâmetros de processamento como pressão de compactação, granulometria, teor de umidade e uso de aglutinantes.

Essa integração permite projetar um biocombustível sólido com elevada densidade energética, estabilidade estrutural, bom desempenho na combustão e menor emissão de poluentes (Kaliyan, Morey, 2009; Lehmann, Joseph, 2009; Ngene *et al.*, 2024).

Nesse estudo, além do desempenho técnico, os impactos ambientais, sociais e econômicos são trazidos em foco. A produção de briquetes de biocarvão a partir de resíduos agroindustriais e florestais insere-se na lógica da economia circular, ao agregar valor a subprodutos que poderiam ser descartados inadequadamente, reduzindo passivos ambientais, promovendo o uso eficiente de recursos e gerando ativos econômicos. No contexto da descarbonização, o uso do biocarvão como biocombustível sólido contribui para modelos energéticos de baixo carbono, auxiliando na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (Geissdoerfer *et al.*, 2017; Lehmann, Joseph, 2015; Woolf *et al.*, 2010).

Cabe destacar que esse estudo, ao promover energia limpa, inovação tecnológica sustentável, gestão responsável de resíduos e ação climática, está alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente o ODS 7 (Energia Acessível e Limpa), o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima). No Brasil, a abundância de resíduos provenientes das cadeias sucroenergética, florestal e agropecuária cria condições favoráveis para o avanço de tecnologias de conversão e densificação de biomassa, fortalecendo políticas de diversificação da matriz energética e aproveitamento energético de resíduos (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2024; Geissdoerfer *et al.*, 2017; Organização das Nações Unidas – ONU, 2015).

Os impactos desta pesquisa estendem-se à esfera social, ao ampliar alternativas energéticas sustentáveis, contribuir para a segurança energética e potencialmente beneficiar comunidades com acesso limitado a fontes modernas de energia. Há ainda estímulo à geração de empregos e renda na cadeia produtiva da biomassa, impulsionando a bioeconomia e diversificando mercados, especialmente em regiões rurais.

Do ponto de vista científico e tecnológico, o estudo promove avanços nos processos de conversão térmica e no design de biocombustíveis sólidos de maior eficiência energética. No âmbito educacional, fortalece a formação de recursos humanos qualificados em bioenergia, engenharia ambiental e tecnologia de materiais sustentáveis. Esta pesquisa traz contribuições em escala local, regional, nacional e

internacional, por tratar de assuntos e abordar conceitos de interesses globais, contribuindo para o avanço da transição energética e para a consolidação de modelos produtivos sustentáveis baseados na economia circular e na descarbonização industrial.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo geral o desenvolvimento de um biocombustível sólido de alto desempenho, produzido a partir de biocarvão proveniente da pirólise da biomassa de tocos e raízes de eucalipto. A partir dos bioprodutos da pirólise – biocarvão e bio-óleo pesado, objetiva-se desenvolver briquetes de alto desempenho à base desses bioprodutos da pirólise. Com isso, promove-se novas tecnologias de obtenção de biocombustíveis renováveis a partir do aproveitamento da biomassa residual florestal de eucalipto, impactando positivamente no desenvolvimento de soluções de baixo carbono e, como consequência, promovendo a redução das emissões de gases de efeito estufa – GEE.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A seguir, tem-se os objetivos específicos desse estudo:

- Caracterização da biomassa tocos e raízes de eucalipto;
- Seleção da melhor condição de pirólise, objetivando maximizar as quantidades produzidas de biocarvão e de bio-óleo pesado – em escala laboratorial;
- Produção de biocarvão e bio-óleo pesado em escala piloto, a partir da seleção da melhor condição de pirólise;
- Ensaio de adensamento energético em briquetadeira de bancada (variáveis: temperatura e pressão de prensagem; tempo de residência; percentual de aglutinante);
- Caracterização físico-química dos briquetes (análise imediata; análise elementar CHNS-O; PCS/PCI e TGA/dTG/DSC);
- Planejamento experimental (*Response Surface Methodology*), com foco na otimização do processo de briquetagem;
- Validação do processo de produção dos briquetes em escala laboratorial;

5 CONCLUSÃO

O presente estudo atingiu o objetivo de desenvolver um biocombustível sólido de alto desempenho a partir do biocarvão produzido pela pirólise da biomassa residual de tocos e raízes de eucalipto.

A caracterização da biomassa demonstrou que os resíduos de tocos e raízes apresentam propriedades físico-químicas compatíveis com sua utilização como matéria-prima para produção de biocarvão, evidenciando elevado potencial para aplicações energéticas.

O planejamento experimental aplicado à pirólise permitiu identificar a condição operacional mais adequada para maximizar a produção tanto de biocarvão, quanto de bio-óleo pesado. A condição de 400 °C por 90 minutos proporcionou biocarvão com elevado teor de carbono fixo e alto poder calorífico, confirmando a eficiência da rota termoquímica proposta, além de ser a condição experimental que apresentou os maiores rendimentos de produção tanto de biocarvão, quanto de bio-óleo pesado.

A produção do biocarvão em escala piloto comprovou a possibilidade de obtenção dos bioprodutos da pirólise em condições representativas para futuras etapas de escalonamento tecnológico.

O planejamento experimental aplicado ao processo de briquetagem possibilitou a otimização simultânea das variáveis de processamento e da formulação dos briquetes, resultando em modelos estatísticos com boa capacidade preditiva para as principais propriedades avaliadas.

A validação experimental confirmou a confiabilidade da otimização realizada. Entre as formulações de briquetes avaliadas, a amostra C apresentou o melhor desempenho global, conciliando resistência mecânica, estabilidade física e elevado desempenho energético, demonstrando que a combinação de biocarvão, bio-óleo pesado e amido constitui uma alternativa tecnicamente viável para produção de briquetes de alto desempenho.

De forma geral, esta pesquisa demonstrou a viabilidade técnica do aproveitamento de resíduos de tocos e raízes de eucalipto para a produção de combustíveis sólidos renováveis, agregando valor a um resíduo florestal pouco explorado e contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias voltadas à bioeconomia, à economia circular e à descarbonização industrial.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de normas Técnicas. Bagaço de cana de açúcar – caracterização química. **NBR16550**, 2018.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Carvão mineral - Determinação de umidade. **NBR8293 (MB1893)**, 1983.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Carvão mineral - Determinação do teor de matérias voláteis. **NBR8290**, 1983.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Carvão mineral - Determinação do carbono fixo. **NBR8299**, 1983.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Carvão mineral - Determinação do teor de cinzas. **NBR8289**, 1983.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Carvão mineral - Determinação do poder calorífico superior e do poder calorífico inferior. **NBR8628**, 1984.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Carvão Vegetal - Análise Imediata. **NBR-8112 (MB1857)**, outubro 1986.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico. **NBR8633**, 1984.

AGIRRE, I.; GRIESSACHER, T.; RÖSLER, G.; ANTREKOWITSCH, J. Production of charcoal as an alternative reducing agent from agricultural residues using a semi-continuous semi-pilot scale pyrolysis screw reactor. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 106, p. 114-121, 2013.

ALVES, J. L. F.; DA SILVA, J. C. G.; DA SILVA FILHO, V. F.; ALVES, R. F.; DE ARAUJO GALDINO, W. V.; DE SENA, R. F. Kinetics and thermodynamics parameters evaluation of pyrolysis of invasive aquatic macrophytes to determine their bioenergy potentials. **Biomass and bioenergy**, v. 121, p. 28-40, 2019.

ASTM. American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. **D3172-89**, 1997, 3p.

ASTM. American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke. **D3176-89**, 2002, 3p.

ASTM. American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels. **E870-82(1998)e1**, 2019, 2p.

ASTM. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. **D3173-87**, 1996, 3p.

ASTM. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. **C496/C496M – 17**, 2017, 5p.

ASTM. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Tumber Test for Coke. **CD3402-93 (Reapproved 2001)**, 1993, 3p.

BASU, P. **Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory**. 3. ed. London: Academic Press, 2018.

BORGES, A. D. S.; CARDOSO, M.; OLIVEIRA, M. Thermochemical evaluation of biochars properties from portuguese agro-forestry residues for solid fuel applications. **Scientific Reports**, v. 16, p. 1120, 2026.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68–94, 2012.

Caracterização química da madeira de tocos e raízes de eucalipto. In: GUERRA, S. P. S. EUFRADE JUNIOR, H. J. **Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes de florestas plantadas**. Botucatu: Fepaf, 2019. p. 107-122.

CEREDA, M. P. (Coord.). **Agricultura: tuberosas amiláceas latino-americanas**. São Paulo: Fundação Cargill, 2002. 540 p.

COSTA, A. C. L. A. **Caracterização Físico-Química da Biomassa de Tocos e Raízes de Clones de Eucalipto para Fins Energéticos**. 2019. 79 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2019.

COSTA, A. C. L. A.; GUERRA, S. P. S.; SPADIM, E. R.; PASSOS, J. R. S.; EUFRADE-JUNIOR, H. J. Caracterização física e química de tocos e raízes de *Eucalyptus* para bioenergia. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 49, n. 129, e3433, 2021.

DEMIRBAS, A. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Amsterdam**, v. 72, n. 2, p. 243–248, 2004.

DIAS JÚNIOR, A. F. **Carvão vegetal para cocção de alimentos: aspectos mercadológicos e de qualidade para consumo**. 2018. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

DOS REIS, A. A., PROTÁSIO, T. D. P., ALVES DE MELO, I. C. N., TRUGILHO, P. F., OLIVEIRA CARNEIRO, A. D. C. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Brazilian Journal of Forest Research/Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço energético nacional 2025: ano base 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2025.

FELFLI, F. E. F. **Torrefação de biomassa, viabilidade técnica e potencial de mercado**. 2003. Dissertação (doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

FELICIANO-BRUZUAL, C. Charcoal injection in blast furnaces (Bio-PCI): CO₂ reduction potential and economic prospects. **Journal of Materials Research and Technology**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 3, p. 233-243, 2014.

FURTADO, T. S.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; BELLOTE, A. F. J. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 62, p. 101-106, 2010.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The circular economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757–768, 2017.

GOMINHO, J., COSTA, R. A., LOURENÇO, A., QUILHÓ, T., PEREIRA, H. Eucalyptus globulus stumps bark: chemical and anatomical characterization under a valorisation perspective. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, n. 3, p. 1253-1265, 2021.

GOMINHO, J.; LOURENÇO, A.; MIRANDA, I.; PEREIRA, H. Chemical and fuel properties of stumps biomass from Eucalyptus globulus plantations. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 39, n. 1, p. 12-16, 2012.

GROVER, P. D.; MISHRA, S. K. **Biomass briquetting: technology and practices**. Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations Regional Wood Energy Development Programme in Asia, 1996.

GUPTA, R. C. WOODCHAR AS A SUSTAINABLE REDUCTANT FOR IRONMAKING IN THE 21ST CENTURY. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, New York, v. 24, n. 3-4, p. 203-231, 2003.

HAKEEM, K. R.; JAWAID, M.; RASHID, U. **Biomass and Bioenergy: Processing and Properties**. Cham: Springer International Publishing, 2014. 377 p.

HASIBUAN, R.; HIDAYATI, J.; MISRAN, E.; SAMOSIR, R. N.; SITOANG, A. J.; PRAMANANDA, V.; FAZILLAH, R. Characteristics of bio-briquettes from candlenut shells as a renewable energy: Selection of adhesive type, adhesive concentration, and biochar particle size. **Journal of Ecological Engineering**, v. 26, n. 10, p. 316–327, 2025.

HERIYANTI, A. P.; BAKRI, S. N. S.; JABBAR, A.; KHOLIL, P. A.; AMELIA, R. N.; SAVITRI, E. N.; RIFAATUNNISA; DEWI, S. H.; SULTAN, H. Exploring Biochar Briquettes from Biomass Waste for Sustainable Energy. **Advance Sustainable Science, Engineering and Technology**, v. 7, n. 3, p. 0250303-01 - 0250303-014, 2025.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual 2025**. São Paulo: IBÁ, 2025. Disponível em: <<https://iba.org/publicacoes/relatorios-anuais/>>. Acesso em: 21 maio 2026.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2016**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2016. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2019/07/2016_relatorio-de-sustentabilidade.pdf>. Acesso em: 19 maio 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables 2024: analysis and forecast to 2030**. Paris: IEA, 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **World energy transitions outlook 2023**. Abu Dhabi: IRENA, 2023.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, n. 3, p. 337-359, 2009.

KEILUWEIT, M.; NICO, P. S.; JOHNSON, M. G.; KLEBER, M. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 44, n. 4, p. 1247–1253, 2010.

KUMAR, A.; JONES, D. D.; HANNA, M. A. Thermochemical Biomass Gasification: A Review of the Current Status of the Technology. **Energies**, MDPI, v. 2, n. 3, p. 556-581, 2009.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**. 2 ed. London: Earthscan, 2009.

LEONELLO, E. C.; ARRUDA, N. L. F. V.; PASSOS, J. R. S.; PROSDOCINI, A. B. P. MATTIOLLI, L. **Desenvolvimento de Fertilizantes de Liberação Lenta com Base em Biocarvão de Bagaço de Cana-de-Açúcar**. 2020. 70 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista – Programa de Pós-Graduação em Química, 2020.

MISSAU, J.; BERTUOL, D. A.; TANABE, E. H. Charcoal briquetting: na environmentally friendly destination for waste materials. **Environmental Engineering Science**, v. 38, n. 9, p. 841-853, 2021.

MOHAN, D.; PITTMAN JR., C. U.; STEELE, P. H. **Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review**. *Energy & Fuels*, Washington, v. 20, n. 3, p. 848–889, 2006.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

NEVES, D.; THUNMAN, H.; MATOS, A.; TARELHO, L.; GOMEZ-BAREA, A. Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 37, n. 5, p. 611–630, 2011.

NGENE, G. I.; BOUESSO, B.; MARTÍNEZ, M. G.; NZIHOU, A. A review on biochar briquetting: common practices and recommendations to enhance mechanical properties and environmental performances. **Journal of Cleaner Production**, v. 469, p. 143193-143208, 2024.

OLIVEIRA, A, V. **Estudo da Produção e Caracterização de Biochar Oriundo da Pirólise do Resíduo de Maçã e Suas Aplicações**. 2021. 87 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia – Programa de Pós Graduação em Química, 2021.

ONG, H. C.; CHEN, W. H.; FAROOQ, A.; GAN, Y. Y.; LEE, K. T.; ASHOKKUMAR, V. Catalytic thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 113, p. 109266, 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Nova York: ONU, 2015.

ORHADAHWE, T. A.; ADELEKE, A. A.; IKUBANNI, P. P.; ADELEKE, W. A.; ELEWA, R. R.; SAMUEL, A. A.; ODUSOTE, J. K. Physico-mechanical properties of briquettes produced from woody biomass. **Latin American Applied Research - An international Journal**, v. 55, n. 1, p. 89-93, 2024.

ORTIZ, C. A.; HAMMAR, T.; AHLGREN, S.; HANSSON, P. A.; STENDAHL, J. Time-dependent global warming impact of tree stump bioenergy in Sweden. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 371, p. 5-14, 2016.

PADILLA, E. R. D. **Biochar produzido a partir de casca de coco: aplicações como fonte de carbono nos altos-fornos**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia e Ciências, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2023.

PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; REZENDE, R. N.; ASSIS, C. O.; BALIZA, A. E. R. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [S. l.], v. 31, n. 66, p. 103-112, 2011.

PINTO, F.; GOMINHO, J.; ANDRÉ, R. N.; GONÇALVES, D.; MIRANDA, M.; VARELA, F.; NEVES, D.; SANTOS, J.; LOURENÇO, A.; PEREIRA, H. Improvement of gasification performance of Eucalyptus globulus stumps with torrefaction and densification pre-treatments. **Fuel**, London, v. 206, p. 289-299, 2017.

POHLMANN, J. G.; BORREGO, A. G.; OSÓRIO, E.; DIEZ, M. A.; VILELA, A. C. F. Combustion of eucalyptus charcoals and coals of similar volatile yields aiming at blast furnace injection in a CO₂ mitigation environment. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 129, p. 1-11, 2016.

PROTÁSIO, T. D. P.; BUFALINO, L.; GUIMARÃES JÚNIOR, M.; TONOLI, G. H. D.; TRUGILHO, P. F. Técnicas multivariadas aplicadas à avaliação de resíduos lignocelulósicos para a produção de bioenergia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 4, p. 771-781, 2013.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY (REN21). **Renewables 2024 global status report**. Paris: REN21, 2024.

ROUSSET, P.; FIGUEIREDO, C.; SOUZA, M.; QUIRINO, W. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 92, n. 10, p. 1890-1897, 2011.

ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

SÁ, L. F.; TAMBARUSSI, E. V. Melhoramento genético e produtividade florestal. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 99-112, 2023.

SANTOS, G. H. F.; NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. Biomassa como energia renovável no Brasil. **Uningá Review**, Maringá, v. 29, n. 2, p. 6-13, 2017.

SARKER, T. R.; ETHEN, D. Z.; NANDA, S. Decarbonization of Metallurgy and Steelmaking Industries Using Biochar: A Review. **Chemical Engineering Technology**, v. 47, n. 12, p. e202400217, 2024

SILVA, C. R. A.; GARRAFA, M. T. F.; NAVARENHO, P. L.; GADO, R.; YOSHIMA, S. A biomassa como alternativa energética para o Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 2, p. 25–36, 2005.

SILVA, R. C.; SILVA, G. C. R.; MARCHESAN, R.; SOUZA, P. B.; COLARES, C. J. G.; REIS, G. M. F.; FERRAZ, F. A.; SILVA, D. A. Energy potential of Eucalyptus spp. Clone biomass. in the northern region of the legal amazon. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, [S. l.], v. 22, n. 3, p. 01-18, 2024.

SILVA, S. P.; AKASAKI, J. L.; SANCHES, A. O. Reaproveitamento do resíduo da madeira de eucalipto (RME) para a produção de energia sustentável. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 13, n. 28, p. 82-98, 2020.

SUOPAJÄRVI, H.; PONGRÁCZ, E.; FABRITIUS, T. The potential of using biomass-based reducing agents in the blast furnace: A review of thermochemical conversion technologies and assessments related to sustainability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 25, p. 511-528, 2013.

TRIPATHI, M.; SAHU, J. N.; GANESH, A. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 55, p. 467-481, 2016.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T.; KENNEY, K. L.; HESS, J. R. **A review on biomass densification technologies for energy application**. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2010.

UDEMBA, E. N.; TOSUN, M. Energy transition and diversification: A pathway to achieve sustainable development goals (SDGs) in Brazil. **Energy**, v. 239, Part C, p. 122199, 2022.

VARMA, A. K.; MONDAL, P. Pyrolysis of pine needles: effects of process parameters on products yield and analysis of products. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 131, n. 3, p. 2057-2072, 2018.

VILAS-BOAS, A. C. M.; TARELHO, L. A. C.; OLIVEIRA, H. S. M.; SILVA, F. G. C. S.; PIO, D. T.; MATOS, M. A. A. Valorisation of residual biomass by pyrolysis: influence of process conditions on products. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 8, p. 379–396, 2024.

VON OECH, R. **Um “toc” na cuca**: técnicas para estimular a criatividade. São Paulo: Cultura Editores Associados, 1983.

WALOZI, R.; ONEP, G. S.; SANUSI, Y. S.; BABIKER, O. E.; DENNISON, M. S.; CANDIA, A.; OKURUT, S. Critical review of biomass heterogeneity effects on briquette combustion. **Discover Applied Sciences**, v. 8, p. 309, 2026.

WALTER, A. Emissões de gases de efeito estufa no setor de energia no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27, n. 3, 2021.

WANG, C.; MELLIN, P.; LÖVGREN, J.; NILSSON, L.; YANG, W.; SALMAN, H.; HULTGREN, A.; LARSSON, M. Biomass as blast furnace injectant – Considering availability, pretreatment and deployment in the Swedish steel industry. **Energy Conversion and Management**, London, v. 102, p. 217-226, 2015.

WOOLF, D.; AMONETTE, J. E.; STREET-PERROTT, F. A.; LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, v. 1, n. 56, p. 1–9, 2010.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, London, v. 86, p. 1781-1788, 2007.