



Valorização energética da casca de macadâmia via pirólise: uma revisão bibliométrica com aplicação do método ProKnow-C

Energy recovery from macadamia husk via pyrolysis: a bibliometric review using the ProKnow-C method

Lyon Lopes Cosme¹, Daniel da Cunha Ribeiro², Marcos Wagner Jesus Servare Junior², Taisa Shimosakai de Lira²

¹ Aluno do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

² Docente do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: lyon.cosme@edu.ufes.br

Received: 10 July 2028 | Accepted: 31 August 2026 | Published online: 02 September 2026

Resumo: A crescente demanda por fontes de energia renováveis impulsiona a busca por métodos eficientes de valorização de resíduos de biomassa, como a casca de macadâmia, um subproduto agroindustrial com potencial energético subutilizado. Este estudo teve como objetivo principal comparar sistematicamente a pirólise e a carbonização hidrotérmica (HTC) como rotas para a conversão termoquímica da casca de macadâmia, avaliando as propriedades dos produtos sólidos e seu potencial como biocombustíveis. Então, empregou-se uma metodologia de revisão bibliográfica baseada no método ProKnow-C, que permitiu a seleção e análise aprofundada de um portfólio de dez artigos científicos relevantes. Os resultados da análise revelaram que, embora a pirólise seja eficaz na concentração de carbono e no aumento do poder calorífico superior (HHV) do biocarvão, ela tende a elevar o teor de cinzas. Em contraste, a HTC demonstrou ser particularmente vantajosa na redução significativa do teor de cinzas, produzindo um material mais limpo, e na retenção de uma maior fração da energia original da biomassa, resultando em eficiências energéticas globais superiores. A análise comparativa do comportamento de combustão indicou que o biocarvão pirolítico apresenta maior estabilidade térmica, enquanto o hidrocarvão exibe um perfil de combustão em duas etapas, com taxas iniciais de liberação de energia mais elevadas. Conclui-se que a escolha entre pirólise e HTC para a casca de macadâmia depende dos requisitos específicos da aplicação final, seja para um biocombustível de alta densidade energética ou para um produto com baixo teor de cinzas. Este trabalho contribui para a compreensão das vantagens e limitações de cada processo, fornecendo subsídios para a otimização da valorização energética desse resíduo.

Palavras-chave: Pirólise; Carbonização hidrotérmica; Casca de macadâmia; Biocombustíveis; Biocarvão.

Abstract: The growing demand for renewable energy sources drives the search for efficient methods to valorize biomass waste, such as macadamia shell, an agro-industrial byproduct with underutilized energy potential. This study aimed to systematically compare pyrolysis and hydrothermal carbonization (HTC) as thermochemical conversion routes for macadamia shell, evaluating the properties of the solid products and their potential as biofuels. For this purpose, a bibliographic review methodology based on the ProKnow-C method was employed, allowing for the selection and in-depth analysis of a portfolio of ten relevant scientific articles. The analysis results revealed that, although pyrolysis is effective in carbon concentration and increasing the higher heating value (HHV) of biochar, it tends to raise the ash content. In contrast, HTC proved to be particularly advantageous in significantly reducing ash content, producing a cleaner material, and retaining a larger fraction of the biomass's original energy, resulting in superior global energy efficiencies. Comparative analysis of combustion behavior indicated that pyrolytic biochar exhibits greater thermal stability, while hydrochar displays a two-stage combustion profile with higher initial energy release rates. It is concluded that the choice between pyrolysis and HTC for macadamia shell depends on the specific requirements of the final application, whether for a high-energy-density biofuel or a low-ash

product. This work contributes to understanding the advantages and limitations of each process, providing insights for optimizing the energy valorization of this residue.

Keywords: Pyrolysis; Hydrothermal Carbonization; Macadamia Shell; Biofuels; Biochar.

1 Introdução

A busca por fontes de energia sustentáveis e a crescente preocupação com as mudanças climáticas têm impulsionado o interesse na valorização da biomassa como alternativa aos combustíveis fósseis. A biomassa lignocelulósica, abundante e renovável, apresenta um potencial significativo para a produção de bioenergia, mas sua utilização direta é frequentemente limitada por características como baixa densidade energética, alto teor de umidade e heterogeneidade composicional (El-Sayed et al., 2024; Lozano et al., 2026).

Para superar essas limitações e otimizar as propriedades da biomassa como biocombustível, diversas tecnologias de conversão termoquímica têm sido desenvolvidas. Entre elas, a pirólise e a carbonização hidrotérmica (HTC) destacam-se como processos eficazes para a produção de materiais carbonáceos com maior teor energético e estabilidade química (Lozano et al., 2026). A pirólise, um processo de decomposição térmica na ausência de oxigênio, gera biocarvão, bio-óleo e gases, com a proporção desses produtos dependendo de condições operacionais como temperatura, taxa de aquecimento e tempo de residência (El-Sayed et al., 2024). Por outro lado, a HTC, realizada em meio aquoso e temperaturas moderadas, produz hidrocarvão, um material com estrutura porosa e maior densidade energética, adequado para diversas aplicações, incluindo biocombustíveis e adsorventes (Lozano et al., 2026).

O aproveitamento de resíduos agroindustriais, como a casca de macadâmia, representa uma oportunidade valiosa para a produção de bioenergia, alinhando-se aos princípios da economia circular e da gestão sustentável de resíduos. Embora a literatura aborde amplamente a pirólise e a HTC de diferentes tipos de biomassa, há uma lacuna na investigação aprofundada e comparativa dessas tecnologias para resíduos específicos como a casca de macadâmia, especialmente no que tange à otimização das condições de processo para maximizar a eficiência energética e a qualidade dos produtos resultantes. Estudos como os de El-Sayed et al. (2024) e Lin et al. (2025) fornecem metodologias robustas para a análise cinética e mecanística da pirólise de biomassa, enquanto Lozano et al. (2026) oferecem uma comparação sistemática entre pirólise e HTC para outras biomassas, estabelecendo um referencial para a presente investigação.

Neste contexto, o presente trabalho visa preencher essa lacuna, realizando uma análise aprofundada da casca de macadâmia como matéria-prima para a produção de biocarvão e hidrocarvão. Para tanto, serão investigadas as características físico-químicas da casca de macadâmia, o comportamento de sua degradação térmica sob diferentes condições de pirólise e HTC, e as propriedades energéticas dos produtos obtidos. O objetivo é fornecer dados e análises que contribuam para a compreensão e o desenvolvimento de estratégias eficientes para a valorização energética desse resíduo, com foco na otimização dos processos de conversão termoquímica.

2 Metodologia

2.1 Bibliometrix

O Bibliometrix, implementado no ambiente R, é um pacote específico para análise bibliométrica que permite importar, tratar e analisar grandes volumes de registros de bases como Scopus e Web of Science (Aria; Cuccurullo, 2017). A ferramenta oferece rotinas para limpeza e padronização de dados, cálculo de indicadores descritivos (como evolução temporal da produção, autores e periódicos mais produtivos, países com maior número de publicações e redes de coautoria) e construção de mapas científicos (redes de co-citação, acoplamento bibliográfico e coocorrência de palavras-chave). Neste estudo, o Bibliometrix foi utilizado para caracterizar o portfólio bibliográfico bruto sobre preços e custos de energia no período 2021–2026, identificando padrões de publicação, fontes mais relevantes e principais países e temas associados ao campo, bem como para subsidiar a etapa de seleção do portfólio final por meio do método Proknow-C.

De acordo com o tema de pesquisa foram definidas as palavras-chaves para a construção do portfólio bibliográfico. Foram escolhidas sete palavras, divididas em três eixos, sendo traduzidas para a língua inglesa, a fim de obter maior relevância e quantidade de artigos, conforme a Tabela 1.

A partir da combinação dessas palavras-chave, realizou-se uma busca sistemática nas bases Scopus e Web of Science, restringindo-se o período de publicação ao intervalo 2021–2026. Foram obtidos inicialmente 754 documentos, distribuídos em 270 fontes distintas (periódicos, livros, capítulos de livro, anais de eventos etc.), que compuseram o portfólio bruto da pesquisa. A produção anual apresenta taxa

média de crescimento de 4,16%, com idade média dos documentos de 2,21 anos, indicando tratar-se de um campo recente e em expansão consistente.

Tabela 1. Palavras-chave.

Eixo	Palavras-chave
Biochar e Biomassa	Biochar, Biomass Pyrolysis, Macadamia Shell
Condições de Pirólise	Pyrolysis Temperature, Carbonization Conditions
Combustão e Substituição de Carvão	Combustion Behavior, Coal Combustion, Co-Combustion

No que se refere aos tipos de documentos, predominam os artigos científicos (565), revisões de literatura (171), capítulos de livro (8), trabalhos de conferência (7), e outros tipos em menor número, conforme apresentado na Figura 1. O conjunto total contabiliza 3.383 autores, com 4.405 aparições de autoria, e 12 documentos de autoria única. A média de coautores por documento é 5,84 e cerca de 34,75% dos trabalhos resultam de coautorias internacionais, evidenciando uma rede de colaboração substancialmente mais ampla e internacionalizada do que a média de campos correlatos, o que reforça o caráter global das pesquisas sobre biochar e comportamento de combustão de biomassa.

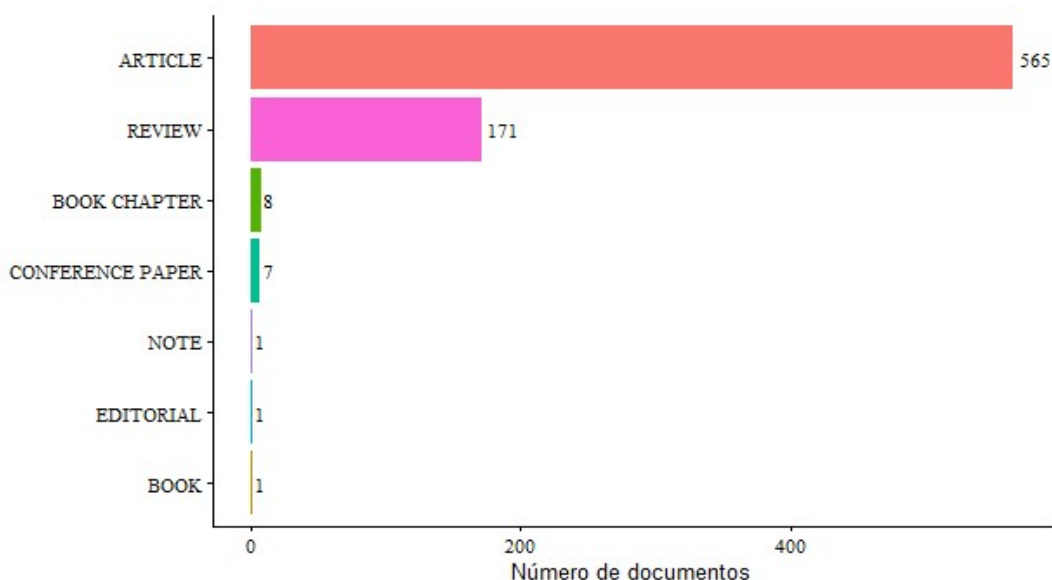


Figura 1. Distribuição por Tipos de Documentos.

Em termos de fontes, destacam-se como periódicos mais produtivos na temática do estudo as revistas *Energies*, *ACS Omega*, *Processes*, *Sustainability*, *Materials*, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *Molecules*, *Industrial Crops and Products*, *Results in Engineering* e *Scientific Reports*, que concentram parcela importante dos artigos sobre biochar, condições de pirólise e comportamento de combustão de biomassa, conforme apresentado na Figura 2.

O Gráfico 1 apresenta o recorte geográfico, observando-se forte presença no número de publicações na China (186 artigos), seguida por Polônia (50), Índia (34), Brasil (29), Indonésia (26), Estados Unidos (25), Austrália (23), Itália (22), Espanha (21) e Alemanha (16). Esse perfil sugere uma concentração da produção em economias com tradição em pesquisa de biomassa e processos termoquímicos, com destaque para a posição do Brasil como quarto país mais produtivo, o que reforça a relevância nacional do tema e o potencial de contribuição de estudos voltados ao aproveitamento de resíduos agroindustriais, como a casca de macadâmia, como substitutos parciais do carvão mineral.

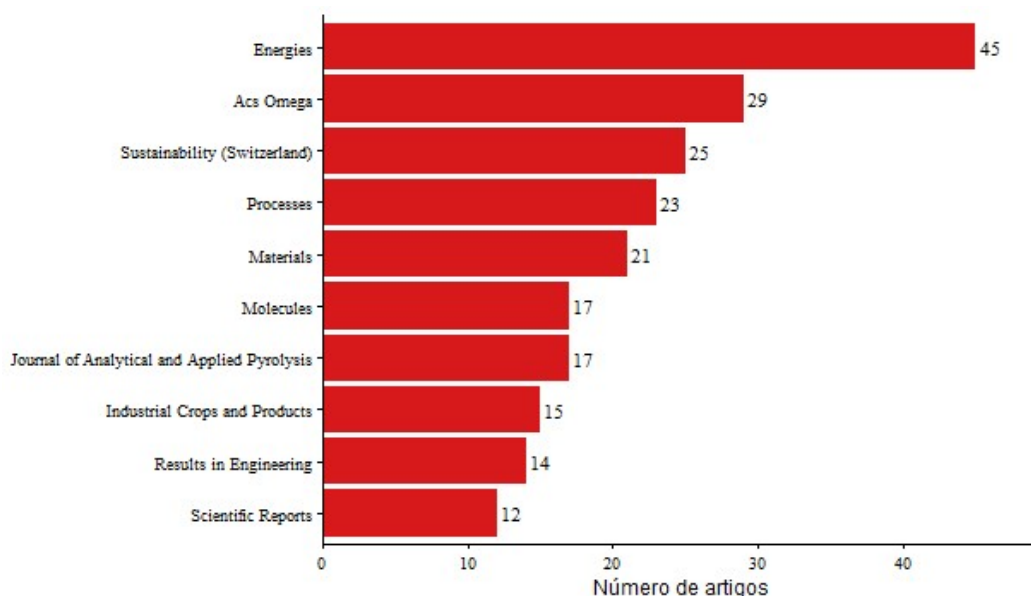


Figura 2. Periódicos mais produtivos.

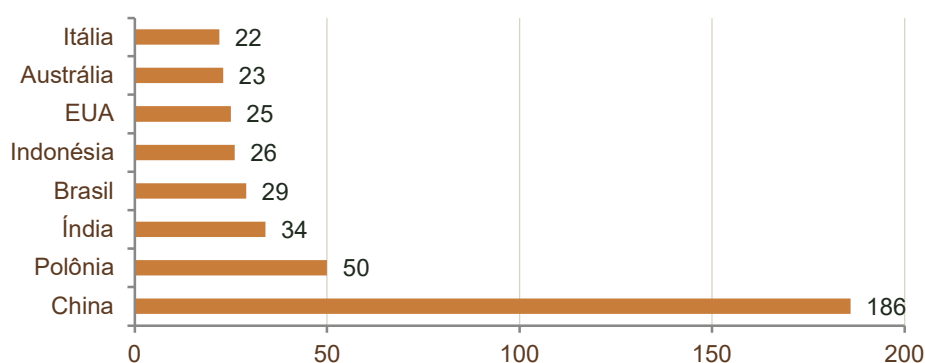


Gráfico 1. Publicação por país.

A partir da Figura 3, pode-se observar que o crescente número de artigos publicados por ano. O ápice de publicações ocorreu em 2025, com um total de 223 artigos, representando o maior volume de artigos observado.

Esse panorama bibliométrico revela que as pesquisas sobre biochar de biomassa, condições de pirólise e comportamento de combustão compõem um campo em crescimento consistente, com taxa anual de 4,16% no período analisado. A convergência entre estudos de valorização de resíduos agroindustriais, processos termoquímicos e substituição de combustíveis fósseis indica que o tema está se consolidando como uma frente relevante dentro da agenda de transição energética. A presença expressiva do Brasil como quarto país mais produtivo, ao lado de China, Polônia e Índia, reforça o potencial de contribuição de pesquisas nacionais voltadas ao aproveitamento de biomassas locais. A elevada média de citações por documento (23,14) e a forte participação internacional nas coautorias (34,75%) sinalizam maturidade científica e relevância global do tema. Os resultados dessa etapa orientam a aplicação do ProKnow-C, subsidiando a seleção de um portfólio reduzido de artigos com maior aderência ao foco específico deste estudo, qual seja, a avaliação do biochar de casca de macadâmia como substituto parcial do carvão mineral.

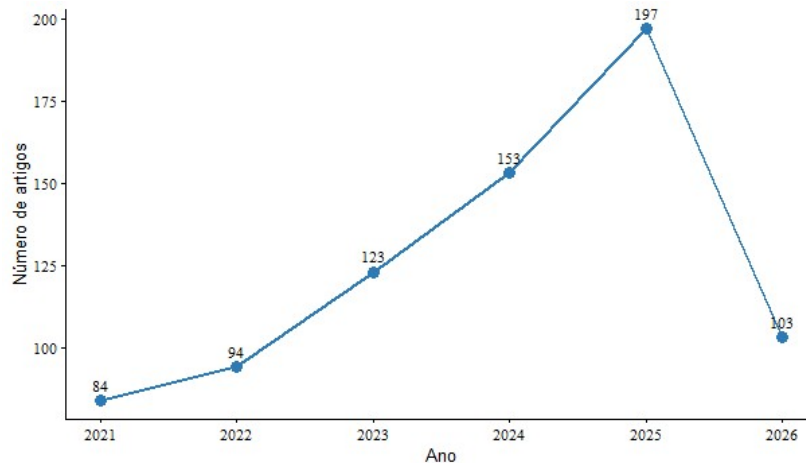


Figura 3. Produção anual.

2.2 Proknow-C

O método Proknow-C consiste em um processo estruturado para a seleção e análise de um portfólio bibliográfico alinhado a um determinado tema de pesquisa, combinando critérios quantitativos (como número de citações) e qualitativos (como aderência temática). No presente trabalho, o Proknow-C foi utilizado para filtrar o conjunto inicial de 754 documentos obtidos nas bases Scopus e Web of Science, de modo a identificar um núcleo de artigos que tratam diretamente da pirólise e co-combustão de biomassa lignocelulósica com ênfase em cascas de nozes e resíduos agroindustriais como alternativa ou complemento ao carvão mineral em processos termoquímicos de geração de energia.

2.2.1 Seleção do portfólio bibliográfico

Para obter a seleção final, foram executadas seis fases de filtragem, que são:

- Fase 1 – Filtro de redundância: Nessa etapa não houve documentos em duplicidade, mantendo-se assim 754 documentos.
- Fase 2 – Leitura dos títulos: Com objetivo de identificar trabalhos que possuem maior afinidade com o tema, os títulos foram analisados, resultando na eliminação de 630 documentos, finalizando a etapa com 124 selecionados.
- Fase 3 – Reconhecimento Científico: Os documentos restantes, foram classificados de acordo com número de citações, em ordem decrescente, sendo os trabalhos de maior número de citações considerados de maior grau de relevância. Utilizando primeiramente, o Princípio de Pareto, foram selecionados os artigos que somadas a porcentagens, obedecendo a ordem de classificação, resultaram em 80% do número de citações, totalizando em 62 trabalhos de destaque. Considerando os artigos dos autores mais populares, que possuem o maior número de publicação entre os não selecionados, não houveram adições, pois todos os títulos fora do Princípio de Pareto tinham autores não prolíficos. Foram selecionadas 20 publicações, que possuíam no máximo 2 anos, restando 82 documentos ao final da etapa.
- Fase 4 – Leitura dos resumos: A partir da leitura dos resumos dos trabalhos restantes da etapa anterior, foram selecionados 10 artigos que possuíam maior aderência com o tema de formação de pirólise de biomassa lignocelulósica, produção e caracterização de biochar como combustível sólido, co-combustão com carvão mineral, cinética termoquímica e propriedades energéticas comparativas.
- Fase 5 – Disponibilidade: Todos os 10 documentos possuíam livre acesso e foram mantidos nessa etapa.
- Fase 6 – Leitura integral: Após a leitura integral das dez publicações, verificou-se que as dez possuíam conteúdo relevante para a elaboração do artigo.

A evolução do número de documentos selecionados ao final de cada etapa pode ser observada na Figura 4.

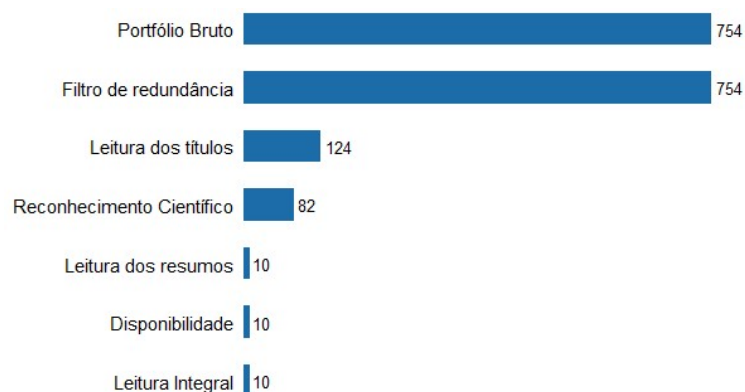


Figura 4. Processo de seleção do portfólio.

Após a aplicação sequencial dos filtros do método Proknow-C, o portfólio bruto inicial foi sendo progressivamente reduzido até a seleção final de 10 artigos com aderência direta ao tema de pesquisa (Tabela 2). Observa-se que a maior redução ocorre nas etapas de leitura de títulos e de leitura dos resumos, o que evidencia, de um lado, a ampla produção bibliográfica tangencial aos processos termoquímicos de biomassa e, de outro, a necessidade de privilegiar estudos com foco explícito na caracterização energética do biochar como substituto ou co-combustível do carvão mineral. A etapa de leitura dos resumos permitiu refinar a aderência temática com maior precisão, assegurando que os trabalhos selecionados tratassem de aspectos como cinética de pirólise, rendimento e propriedades físico-químicas do biochar, valor calorífico superior, análise imediata e ultimate, e comportamento de combustão comparado ao carvão mineral.

Tabela 2. Portfólio final dos artigos selecionados.

Autores	Título	Citações	Fonte
El Hanandeh et al. (2021)	Efeito da temperatura de pirólise e do tamanho de partícula da biomassa no valor calorífico do biocarvão e otimização por MSR	40	Biomass and Bioenergy
Gorshkov et al. (2021)	Análise das características físico-químicas do biochar obtido por pirólise lenta de cascas de nozes em atmosfera de nitrogênio	22	Energies
Kipngetich et al. (2023)	Efeitos da carbonização na combustão de briquetes de casca de arroz em leito fixo	22	Cleaner Engineering and Technology
El-Sayed et al. (2024)	Comportamento de degradação térmica e características cinéticas químicas da pirólise de biomassa por meio de técnicas TG/DTG/DTA	155	Biomass Conv. Biorefinery
Liu et al. (2024)	Comportamento de co-pirólise de carvão mineral e biomassa: efeito sinérgico e análise cinética	46	ACS Omega
Rambhatla et al. (2025)	Pirólise de biomassa para produção de biochar: estudo dos parâmetros cinéticos e efeito da temperatura no rendimento e propriedades físico-químicas do biochar	92	Results in Engineering
El-Fawal et al. (2025)	Produção de biocombustíveis a partir de resíduos: visão abrangente sobre tecnologias de conversão de biomassa e aplicações de biochar	38	RSC Advances
Lin et al. (2025)	Recuperação de energia a partir de resíduos de poda urbana de Ginkgo biloba: otimização da pirólise e melhoria das propriedades	10	Biofuels, Bioproducts and Biorefining
Lozano et al. (2026)	Melhoria das propriedades de biomassa para biocombustíveis: análise comparativa entre pirólise e carbonização hidrotérmica	5	J. Anal. Appl. Pyrolysis

O portfólio resultante é diversificado em termos de origens geográficas (Egito, Espanha, China, Coreia do Sul, Rússia, Brasil, Quênia) e de abordagens metodológicas (análise termogravimétrica, modelos cinéticos isoconversionais, reator de leito fixo, TG-FTIR, Py-GC/MS, calorimetria de bomba), garantindo uma síntese robusta e representativa do estado da arte sobre pirólise de biomassa lignocelulósica para produção de biochar com potencial aplicação energética.

2.3 Análise sistêmica

O portfólio final é composto por dez artigos publicados entre 2021 e 2026, contemplando diferentes contextos geográficos e abordagens metodológicas, mas convergentes em torno da caracterização termoquímica de biomassas lignocelulósicas e da avaliação do biochar como vetor energético. De forma sintética, esses estudos abordam:

- O comportamento de degradação térmica e a cinética de pirólise de biomassas lignocelulósicas por análise termogravimétrica;
- A análise das características físico-químicas do biochar obtido por pirólise lenta de cascas de nozes, com ênfase na casca de macadâmia;
- A comparação entre pirólise e carbonização hidrotérmica como rotas de valorização energética de resíduos agroindustriais;
- A produção e caracterização de biochar a partir de diferentes temperaturas de pirólise e sua aptidão como combustível sólido;
- A influência da temperatura de pirólise e do tamanho de partícula no poder calorífico do biocarvão;
- Uma revisão abrangente das tecnologias de conversão de biomassa e das aplicações do biochar modificado;
- Os efeitos da carbonização sobre as propriedades de combustão de briquetes em leito fixo;
- A otimização da pirólise de resíduos de poda urbana para produção de carvão de alto grau energético;
- O comportamento e os efeitos da co-pirólise de carvão mineral e biomassa em sinergia;
- A análise cinética e os mecanismos de reação da pirólise de palha de arroz por TG-FTIR e Py-GC/MS.

No âmbito da cinética e do comportamento térmico de biomassas lignocelulósicas, El-Sayed, Khasse e Mostafa (2024) investigam a degradação térmica de frondas de palmeira, folhas de oliveira e palha de trigo por meio de técnicas TG/DTG/DTA em atmosfera de nitrogênio, com taxas de aquecimento de 10, 20 e 30 °C/min. Os parâmetros cinéticos foram estimados pelos métodos isoconversionais OFW e KAS, bem como pelo método integral de Coats-Redfern com diferentes modelos de difusão e ordem de reação. Os resultados demonstram que as energias de ativação médias variaram entre 63 e 102 kJ/mol dependendo do método e da biomassa analisada, e que o método OFW forneceu estimativas mais consistentes. Os parâmetros termodinâmicos calculados como: entalpia, energia livre de Gibbs e variação de entropia confirmaram que a decomposição é endotérmica e não espontânea para todas as amostras, e que as biomassas são matérias-primas adequadas para pirólise com formação de produtos de valor.

Complementando essa perspectiva cinética com a caracterização do produto sólido resultante, Gorshkov et al. (2021) estudam a pirólise lenta de sete tipos de cascas de nozes incluindo macadâmia, nogueira, caju, amêndoa, avelã, pistache e noz-de-cola em atmosfera de nitrogênio, com temperaturas do meio de aquecimento entre 400 e 600 °C e taxa de aquecimento de 60 °C/min. A análise termogravimétrica dos biochars obtidos, tanto em meio inerte quanto oxidativo, revelou que a principal perda de massa (32,8–43,0% em massa) ocorre entre 290 e 400 °C, associada à decomposição da celulose. Os biochars de casca de macadâmia e nogueira destacaram-se por apresentar os maiores teores de carbono e, consequentemente, os maiores valores caloríficos entre as amostras estudadas, enquanto o maior grau de coalificação implicou aumento médio de 73 °C na temperatura inicial de oxidação intensa. As energias de ativação determinadas pelo método Coats-Redfern variaram entre 10 e 35 kJ/mol em meio inerte e entre 50 e 80 kJ/mol em meio oxidativo faixa compatível com a decomposição e oxidação de fibras de lignina, respectivamente posicionando a casca de macadâmia como uma das matérias-primas mais promissoras entre as cascas de nozes para aplicações energéticas.

No campo da caracterização e otimização da produção de biochar, Rambhatla et al. (2025) investigam a cinética de pirólise e os efeitos da temperatura sobre o rendimento e as propriedades do biochar produzido a partir de biomassa em reator semi-batelada com atmosfera de nitrogênio, nas temperaturas de 400, 600 e 900 °C. Os parâmetros cinéticos foram estimados pelos modelos KAS, DAEM e Vyazovkin, resultando em energias de ativação de 233, 238 e 225 kJ/mol, respectivamente. Os resultados indicam que temperaturas

mais elevadas (600 e 900 °C) reduzem o rendimento de biochar para cerca de 19%, mas aumentam a área superficial em 17% e o teor de carbono para 76%, com poder calorífico superior de 36,97 MJ/kg a 900 °C, valor comparável ao do carvão betuminoso. Esse desempenho posiciona o biochar produzido a altas temperaturas como candidato robusto para aplicações de base carbonácea, enquanto o produzido a 400 °C é mais adequado como condicionador de solo.

Em perspectiva complementar, El Hanandeh, Albalasmeh e Gharaibeh (2021) investigam os efeitos conjuntos da temperatura de pirólise e do tamanho de partícula sobre o poder calorífico superior do biocarvão produzido a partir de casca de bolota de carvalho, vagem de alfarroba e resíduo sólido de moagem de azeitona, utilizando metodologia de superfície de resposta para otimização multivariada. Os resultados demonstram que o poder calorífico aumenta linearmente com a temperatura para todas as biomassas, mas a influência do tamanho de partícula é dependente da matéria-prima. A análise multidimensional, considerando perspectivas técnica do usuário final e socioambiental revela conflitos de otimização entre produção de biocarvão de alta qualidade e maximização do retorno energético líquido por unidade de biomassa processada, o que implica que a escolha das condições de pirólise deve ser orientada pelo objetivo final de uso do produto.

No campo das revisões abrangentes sobre conversão termoquímica, El-Fawal et al. (2025) consolidam o estado da arte das tecnologias de conversão de biomassa torrefação, pirólise e gaseificação e das aplicações do biochar manipulado em mitigação de poluição, sequestro de carbono e catálise industrial. A revisão enfatiza que, embora a biomassa apresente poder calorífico inferior (10–20 MJ/kg) em relação aos combustíveis fósseis (40–50 MJ/kg), tecnologias de valorização termoquímica são capazes de elevar substancialmente seu conteúdo energético e funcionalidade. Os autores discutem os mecanismos de formação, as modificações de desempenho e os benefícios ecológicos e econômicos do biochar, destacando os desafios de escalabilidade relacionados aos custos tecnológicos, à eficiência dos processos e à dinâmica de mercado como os principais obstáculos à transição para sistemas energéticos baseados em biomassa.

No que diz respeito à combustão do biochar em aplicações práticas, Kipngetich et al. (2023) estudam os efeitos da carbonização sobre as propriedades de combustão de briquetes de casca de arroz em leito fixo operado em modo contracorrente, com diferentes proporções de biochar (25, 50, 75 e 100% em massa) e variação do fluxo mássico de ar. Os resultados mostram que a carbonização eleva o tempo de ignição e a temperatura máxima do leito, mas reduz a velocidade de propagação da chama, a espessura da zona de reação e a taxa de combustão. Briquetes com teores de biochar entre 50 e 75% em massa apresentaram as melhores propriedades combinadas de combustão, evidenciando que misturas parcialmente carbonizadas podem otimizar o balanço entre reatividade, temperatura e estabilidade da combustão, resultado com implicações diretas para o projeto de sistemas de co-combustão de biochar com outros sólidos combustíveis.

Paudel et al. (2025) avaliam a valorização de resíduos de poda urbana de *Ginkgo biloba* mediante pirólise a temperaturas entre 400 e 600 °C, investigando o rendimento, o encolhimento volumétrico e as propriedades combustíveis do carvão produzido. O poder calorífico superior aumentou de 20,76 MJ/kg na biomassa in natura para até 34,26 MJ/kg no carvão a 600 °C, com rendimento energético de até 46,75%. A análise comparativa com padrões de carvão vegetal e de carvão mineral indica que o produto cumpre requisitos de primeira categoria a 550 e 600 °C, embora concentrações elevadas de zinco sinalizem a necessidade de pré-tratamento e de estudos sobre co-pirólise para otimização de recursos. O estudo reforça os benefícios duplos da valorização de resíduos urbanos: gestão de resíduos e produção de energia renovável.

No domínio da co-pirólise e da substituição do carvão mineral, Liu et al. (2024) investigam o comportamento da co-pirólise de carvão mineral e biomassa, com foco nos efeitos sinérgicos entre os dois materiais e na análise cinética das misturas. Os resultados demonstram que a presença de biomassa altera os perfis termogravimétricos do carvão, promovendo efeitos sinérgicos positivos em determinadas faixas de temperatura e proporções de mistura, com redução das temperaturas de início de degradação e modificação dos parâmetros cinéticos em relação ao comportamento individual dos componentes. Esses achados fornecem base experimental e cinética para o desenvolvimento de estratégias de co-combustão que permitam a substituição parcial do carvão mineral por biochar de biomassa lignocelulósica, com potencial de redução de emissões e melhoria da eficiência do processo.

Complementando a análise mecanística da conversão térmica, Lin et al. (2025) conduzem um estudo detalhado da cinética de pirólise e dos mecanismos de reação da palha de arroz por meio de análise termogravimétrica acoplada à espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (TG-FTIR) e pirólise-cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (Py-GC/MS). Os resultados identificam e quantificam os produtos voláteis gerados em cada estágio da pirólise, associando as faixas de temperatura

às decomposições de hemicelulose, celulose e lignina, e revelando os compostos majoritários formados em cada etapa. A abordagem multi-técnica permite correlacionar os parâmetros cinéticos com os mecanismos moleculares de degradação, constituindo referência metodológica relevante para a caracterização cinética de outras biomassas lignocelulósicas, como a casca de macadâmia.

Por fim, Lozano et al. (2026) realizam uma avaliação sistemática e comparativa da pirólise e da carbonização hidrotérmica (HTC) aplicadas a cinco biomassas de origem espanhola podas de laranjeira, oliveira e pinheiro, e cascas de amêndoa e pistache sob condições experimentais harmonizadas. A pirólise foi conduzida em reator de leito fixo a 450, 500 e 550 °C por 30 e 60 min, enquanto a HTC foi realizada em autoclave a 180, 220 e 260 °C por 60, 120 e 240 min. Os resultados indicam que a pirólise eleva o teor de carbono e o poder calorífico superior com o biochar de pinheiro atingindo 27,32 MJ/kg a 500 °C por 60 min mas aumenta o teor de cinzas. A HTC, por sua vez, reduz significativamente o teor de cinzas, mantém maior rendimento energético (EY de até 89,26% para o hidrochar de pinheiro a 180 °C por 240 min) e apresenta maior eficiência energética global (GEE de até 91,80%), configurando-se como processo mais eficiente do ponto de vista energético para aplicações que priorizam limpeza e reatividade do combustível sólido.

A análise conjunta dos dez estudos (Tabela 3) permite identificar alguns padrões transversais.

Tabela 3. Síntese dos trabalhos.

Artigo	Síntese do Trabalho
Gorshkov et al. (2021)	Caracterização físico-química do biochar de cascas de nozes, com destaque para macadâmia como feedstock de maior potencial energético entre as amostras estudadas.
El Hernandez et al. (2021)	Temperatura e tamanho de partícula influenciam o poder calorífico do biocarvão; a otimização depende do objetivo de uso técnico, energético ou socioambiental.
Kipngetch et al. (2023)	A carbonização parcial (50 a 75% de biochar) otimiza as propriedades de combustão em leito fixo, com relevância para sistemas de co-combustão de sólidos.
El-Sayed et al. (2024)	Análise cinética multi-modelo da pirólise de biomassas lignocelulósicas via TGA, com estimativa de parâmetros termodinâmicos e identificação de grupos funcionais por FTIR.
Liu et al. (2024)	Efeitos sinérgicos na co-pirólise de carvão mineral e biomassa alteram os parâmetros cinéticos e sustentam estratégias de substituição parcial do carvão fóssil.
Rambhatla et al. (2025)	Efeito da temperatura de pirólise sobre cinética, rendimento e propriedades do biochar; temperaturas elevadas produzem biochar com poder calorífico compatível ao do carvão mineral.
El-Fawal et al. (2025)	Revisão abrangente das tecnologias de conversão termoquímica e aplicações do biochar, consolidando o potencial do biochar como substituto de combustíveis fósseis.
Lin et al. (2025)	Análise cinética e mecanística por TG-FTIR e Py-GC/MS identifica produtos e mecanismos da pirólise de biomassa lignocelulósica por estágio de decomposição.
Paudel et al. (2025)	Pirólise de resíduos de poda urbana produz carvão de alto valor calorífico (até 34,26 MJ/kg), com potencial para substituição de combustíveis sólidos convencionais.
Lozano et al. (2026)	Comparação sistemática entre pirólise e HTC para cinco biomassas: pirólise maximiza poder calorífico; HTC maximiza eficiência energética global e reduz cinzas.

Em primeiro lugar, há consistência na relação entre temperatura de pirólise e qualidade do biochar: maiores temperaturas aumentam o teor de carbono fixo e o poder calorífico, mas reduzem o rendimento de

sólidos e elevam o teor de cinzas, o que impõe uma compensação que deve ser calibrada conforme o uso final do produto. Em segundo lugar, a composição lignocelulósica da biomassa especialmente o teor de lignina exerce influência determinante sobre os parâmetros cinéticos e sobre as características do biochar resultante, com biomassas de alta lignina, como a casca de macadâmia, tendendo a produzir biochars de maior densidade energética. Em terceiro lugar, abordagens complementares como a co-pirólise com carvão mineral e a carbonização hidrotérmica ampliam a gama de possibilidades de valorização da biomassa, abrindo caminhos para a substituição parcial de combustíveis fósseis em sistemas industriais. Por fim, a caracterização multi-técnica combinando TGA, FTIR, SEM, análise elementar e métodos cinéticos isoconversionais emerge como protocolo consolidado para avaliação da aptidão energética de biomassas lignocelulósicas, sendo diretamente aplicável ao estudo da casca de macadâmia.

3 Resultados e discussões

3.1 Caracterização físico-química das biomassas

A caracterização físico-química das biomassas representa o ponto de partida obrigatório em qualquer investigação sobre conversão termoquímica, pois as propriedades intrínsecas do material condicionam tanto o comportamento durante a pirólise quanto a qualidade dos produtos finais. Os artigos que compõem o portfólio desta revisão demonstram, de maneira consistente, que biomassas lignocelulósicas com baixo teor de umidade geralmente abaixo de 10% em base seca apresentam maior aptidão para a pirólise, uma vez que reduzem a energia dispensada na etapa de secagem e favorecem a formação de voláteis de maior qualidade.

El-Sayed et al. (2024) conduzem análises imediata, elementar, de composição fibrosa e de morfologia superficial para frondas de palmeira, folhas de oliveira e palha de trigo coletadas no Egito. Os três materiais apresentaram teores de umidade inferiores a 8%, o que os autores consideraram compatível com as exigências do processo. O alto conteúdo de matéria volátil entre 53% e 70% foi interpretado como indicativo de facilidade de ignição e de alto potencial de conversão em fase gasosa, ao passo que o elevado carbono fixo da fronda de palmeira (36,12%) sinalizou maior aptidão para a produção de biocarvão com alto poder calorífico. A análise elementar revelou concentrações de carbono entre 35,96% e 52,28%, valores coerentes com os limites típicos reportados para biomassas lignocelulósicas na literatura. A espectroscopia de infravermelho (FTIR) confirmou a presença das principais estruturas de celulose, hemicelulose e lignina em todas as amostras, validando sua adequação como matérias-primas para pirólise.

Gorshkov et al. (2021) adotam abordagem semelhante ao investigar casca de macadâmia, noz e amêndoa, com ênfase nas análises imediata e elementar como base para interpretar o comportamento do material durante a carbonização. A casca de macadâmia destacou-se pelo baixo teor de cinzas e pelo poder calorífico superior elevado, que atingiu 34,26 MJ/kg valor competitivo em relação a carvões minerais de qualidade média o que sustenta o argumento dos autores quanto ao seu potencial como substituto de combustíveis sólidos convencionais. Lozano et al. (2026) complementam essa perspectiva ao caracterizar cinco biomassas de origem agroindustrial espanhola, entre elas cascas de amêndoa e pistache, que se mostraram heterogêneas quanto à composição elementar mas igualmente aptas para os processos de pirólise e carbonização hidrotérmica.

Desse conjunto de dados, emerge um padrão recorrente: biomassas de casca dura, como macadâmia, amêndoa e pistache, tendem a apresentar maior carbono fixo e maior poder calorífico do que resíduos herbáceos como palha de trigo e folhas, o que as posiciona de forma mais favorável para aplicações energéticas diretas. Esse padrão tem implicação direta para os objetivos desta revisão, uma vez que a casca de macadâmia reúne características físico-químicas que justificam seu estudo aprofundado como biomassa de interesse para pirólise.

3.2 Comportamento térmico e parâmetros de pirólise

A análise termogravimétrica (TGA/DTG) é o método mais utilizado nos estudos do portfólio para caracterizar o comportamento de decomposição das biomassas sob condições não-isotérmicas. Os resultados convergem para uma descrição em três estágios que é amplamente reconhecida na literatura: uma primeira etapa de evaporação de umidade e liberação de voláteis leves, uma segunda etapa de desvolatilização ativa onde ocorre a decomposição majoritária de hemicelulose e celulose e uma terceira etapa de decomposição lenta da lignina com formação de carvão residual.

El-Sayed et al. (2024) identificam esse padrão trifásico nas três biomassas estudadas, com a etapa de desvolatilização ativa concentrando entre 81% e 89% da perda de massa total, dependendo do material e

da taxa de aquecimento empregada. Os autores observaram que o aumento da taxa de aquecimento de 10 para 30°C/min deslocou os picos do DTG para temperaturas mais elevadas, fenômeno atribuído à insuficiência de tempo para que a temperatura interna das partículas acompanhe a temperatura programada do forno, o que caracteriza a histerese térmica. A reatividade dos materiais, expressa pelos índices CPI e Ddev, aumentou sistematicamente com a taxa de aquecimento, e a sequência de reatividade observada $PF > WS > OL$ foi explicada pela maior proporção de lignina nas folhas de oliveira, que retarda a decomposição das frações mais reativas.

Lin et al. (2025) aprofundam a análise mecanística ao combinar TGA com FTIR acoplado em linha (TG-FTIR) e Py-GC/MS, o que permitiu identificar os produtos gasosos e os fragmentos moleculares liberados em cada estágio de decomposição. Os autores demonstraram que a faixa de 200 a 400°C é dominada pela liberação de CO₂, água e compostos furânicos provenientes da degradação de hemicelulose e celulose, enquanto acima de 400°C predominam compostos fenólicos característicos da decomposição da lignina. Esse nível de detalhamento mecanístico é essencial para compreender não apenas os rendimentos dos produtos, mas também sua composição química e potencial de aproveitamento.

Liu et al. (2024), ao investigarem a co-pirólise de carvão mineral e biomassa, reportaram que a mistura dos dois materiais produz efeitos sinérgicos que alteram os parâmetros cinéticos em relação aos obtidos para os componentes isolados. A biomassa favoreceu a decomposição antecipada de frações do carvão, reduzindo a temperatura de pico de desvolatilização e aumentando a taxa máxima de perda de massa. Esse comportamento é interpretado como resultado da transferência de calor e da interação entre radicais livres gerados durante a decomposição simultânea dos dois materiais, e tem implicações relevantes para estratégias industriais de substituição parcial do carvão fóssil.

Wang et al. (2021) investigaram especificamente o comportamento de combustão do biocarvão de arroz, demonstrando que as condições de carbonização em especial a temperatura determinam a estrutura cristalina e a reatividade do produto final. Biocarvões produzidos em temperaturas mais elevadas apresentaram maior grau de aromatização e menor reatividade à combustão, ao passo que aqueles obtidos em temperaturas mais baixas conservaram maior proporção de grupos funcionais oxigenados e exibiram ignição mais fácil. Esse compromisso entre estabilidade química e reatividade é um aspecto central para a definição das condições operacionais ótimas de pirólise, qualquer que seja a biomassa de partida.

3.3 Cinética e parâmetros termodinâmicos

A determinação dos parâmetros cinéticos é uma das contribuições mais valorizadas nos estudos do portfólio, uma vez que permite prever o comportamento do material em escala ampliada e comparar diferentes biomassas em bases quantitativas objetivas. Os métodos isoconversionais OFW e KAS predominam como abordagem metodológica, sendo utilizados em seis dos dez artigos analisados, frequentemente em conjunto com o método integral de Coats-Redfern como forma de validação cruzada.

El-Sayed et al. (2024) reportam energias de ativação médias de 91,9 kJ/mol (OFW) e 87,5 kJ/mol (KAS) para frondas de palmeira, de 69,1 e 101,8 kJ/mol para folhas de oliveira, e de 65,2 e 63,4 kJ/mol para palha de trigo, respectivamente. A proximidade entre os valores obtidos pelos dois métodos isoconversionais confirma a consistência dos modelos, ao passo que a maior discrepância observada para as folhas de oliveira 32,7 kJ/mol de diferença entre OFW e KAS é atribuída à sua composição atípica, com alto teor de lignina em relação às frações mais reativas. Os autores observaram ainda que os valores de energia de ativação obtidos pelo método integral de difusão se mostraram próximos aos do KAS, enquanto os modelos de ordem de reação se aproximaram mais dos resultados do OFW, sugerindo que a escolha do modelo de referência tem impacto direto sobre a interpretação dos mecanismos de decomposição.

Liu et al. (2024) demonstram que os parâmetros cinéticos da co-pirólise não são simplesmente a média ponderada dos valores individuais de carvão e biomassa, o que evidencia a presença de interações sinérgicas. A energia de ativação resultante das misturas foi inferior à esperada pela adição linear dos componentes, indicando que a biomassa facilita a decomposição do carvão ao promover um ambiente reativo mais favorável. Esse achado é especialmente relevante para aplicações em que a substituição parcial de carvão mineral por biomassa seja avaliada do ponto de vista de viabilidade cinética.

No que diz respeito aos parâmetros termodinâmicos, todos os estudos que os calculam entre eles El-Sayed et al. (2024) e Lin et al. (2025) reportam valores positivos de entalpia ($\Delta H > 0$) e de energia livre de Gibbs ($\Delta G > 0$), confirmando o caráter endotérmico e não-espontâneo das reações de decomposição térmica. A variação de entropia negativa ($\Delta S < 0$) indica que os produtos formados apresentam menor grau de desordem do que o reagente inicial, o que é consistente com a formação de estruturas carbonosas mais organizadas, como o biocarvão. Os valores de ΔG calculados para a faixa de conversão de 0,2 a 0,8

situaram-se entre 160 e 190 kJ/mol para as biomassas de El-Sayed et al. (2024), intervalo que indica a necessidade de fornecimento contínuo de energia para manter o processo, reforçando a importância do controle preciso das condições operacionais.

3.4 Rendimento e qualidade dos produtos sólidos

A análise dos rendimentos e das propriedades dos produtos sólidos obtidos pela pirólise constitui outro eixo temático central do portfólio. Os estudos são convergentes em apontar que o aumento da temperatura de pirólise reduz o rendimento de biocarvão e eleva seu teor de carbono fixo e poder calorífico, enquanto o aumento do tempo de residência tem efeito secundário, menos pronunciado sobre o rendimento sólido.

Lozano et al. (2026) fornecem um dos conjuntos de dados mais abrangentes do portfólio nesse aspecto, ao comparar pirólise e carbonização hidrotérmica (HTC) para cinco biomassas agroindustriais espanholas. Os biocarvões de pinheiro produzidos a 500°C por 60 minutos atingiram poder calorífico de 27,32 MJ/kg e teor de carbono de 97,58%, valores que situam esse produto em patamar competitivo com carvões minerais de qualidade intermediária. Em contrapartida, a HTC produziu sólidos com maior rendimento energético (EY de até 89,26% para pinheiro a 180°C por 240 min) e menor teor de cinzas, em razão da lixiviação de minerais para a fase líquida durante o processo úmido. A eficiência energética global (GEE) da HTC superou consistentemente a da pirólise para todas as biomassas testadas, com valores de até 91,80% para pinheiro, enquanto a pirólise raramente ultrapassou 42%.

Gorshkov et al. (2021) oferecem uma perspectiva complementar ao demonstrar que a casca de macadâmia produz biocarvão com poder calorífico superior a 34 MJ/kg quando submetida à carbonização em condições controladas, valor que supera os reportados por Lozano et al. (2026) para as biomassas europeias. Esse resultado pode ser explicado pelo alto teor de carbono e pelo baixo teor de cinzas da casca de macadâmia in natura, características que se potencializam durante o processo de carbonização.

Buragohain et al. (2023), ao avaliarem o efeito da temperatura de pirólise e do tamanho de partícula sobre as propriedades do biocarvão, demonstraram que partículas menores favorecem a transferência de calor e produzem biocarvões com maior homogeneidade de composição, ao passo que partículas maiores tendem a gerar gradientes internos de temperatura que comprometem a qualidade do produto. A temperatura ótima identificada pelos autores situou-se entre 500°C e 600°C, faixa em que o compromisso entre rendimento sólido e qualidade do biocarvão é mais favorável para a maioria das biomassas lignocelulósicas estudadas.

3.5 Aplicações do biocarvão e potencial de substituição do carvão mineral

Um aspecto transversal aos artigos do portfólio é a discussão sobre as possíveis aplicações do biocarvão, que vão desde a geração de energia por combustão direta até a melhoria de solos, passando pelo uso como agente redutor em processos metalúrgicos. A questão da substituição parcial do carvão mineral emerge como motivação implícita ou explícita em pelo menos seis dos dez estudos analisados.

Wang et al. (2021) abordam diretamente o comportamento do biocarvão de casca de arroz durante a combustão, investigando como as condições de carbonização afetam a reatividade e o perfil de queima do produto. Os autores demonstraram que biocarvões obtidos em temperaturas mais baixas entre 300°C e 500°C apresentam maior reatividade inicial e menor temperatura de ignição, características desejáveis para aplicações em caldeiras industriais projetadas para carvão mineral. Liu et al. (2024) avançam nessa direção ao modelar os efeitos sinérgicos da co-pirólise de carvão e biomassa, argumentando que a adição de biomassa em proporções de 20% a 40% pode reduzir a energia de ativação do processo de combustão sem comprometer significativamente o poder calorífico da mistura.

Gorshkov et al. (2021) posicionam a casca de macadâmia nesse contexto de substituição de forma explícita, ao comparar o poder calorífico do biocarvão por eles obtido com os valores típicos de carvões minerais utilizados na indústria. Com 34,26 MJ/kg, o biocarvão de macadâmia se aproxima dos carvões betuminosos de qualidade intermediária, o que sustenta a tese de que resíduos agroindustriais de alta densidade energética podem constituir alternativas viáveis de substituição em cenários onde a descarbonização da matriz energética é mandatória.

Essa convergência de achados aponta para uma lacuna específica ainda pouco explorada: a ausência de estudos que avaliem de forma integrada a cinética de pirólise, o comportamento de combustão do biocarvão e os efeitos sinérgicos em co-pirólise especificamente para a casca de macadâmia. Os artigos do portfólio fornecem a base metodológica e os parâmetros de referência necessários para estruturar essa

investigação, mas nenhum deles a executa diretamente, o que justifica e delimita o escopo do presente trabalho.

4 Conclusões

Esta revisão bibliográfica reuniu dez estudos publicados entre 2021 e 2026, todos voltados à conversão termoquímica de biomassas lignocelulósicas por pirólise, com recortes que abrangem desde a análise cinética e termodinâmica até a caracterização estrutural dos produtos sólidos e o comportamento sinérgico em co-pirólise. O conjunto evidencia que, nas últimas décadas, o campo avançou consideravelmente na padronização de metodologias e na compreensão dos mecanismos de decomposição térmica, mas ainda carece de estudos que traduzam esse conhecimento para biomassas específicas de interesse regional, como é o caso da casca de macadâmia no contexto brasileiro.

- a) Do ponto de vista metodológico, o uso combinado dos métodos isoconversionais OFW e KAS consolidou-se como abordagem de referência para a estimativa de energia de ativação, tendo sido adotado pela maioria dos estudos analisados. Os valores obtidos variam em função da composição lignocelulósica de cada biomassa, da taxa de aquecimento e do intervalo de conversão considerado, e essa variabilidade reforça a impossibilidade de generalizar parâmetros cinéticos sem uma caracterização detalhada do material de partida. A análise termogravimétrica, conduzida em múltiplas taxas de aquecimento sob atmosfera inerte, permanece como o procedimento padrão mais confiável para esse fim.
- b) No que diz respeito aos produtos da pirólise, os trabalhos analisados convergem para uma relação inversa entre temperatura e rendimento de biocarvão, com o aumento da temperatura favorecendo a fração líquida e gasosa e elevando o teor de carbono fixo no sólido residual. O poder calorífico superior do biocarvão tende a superar o da biomassa de origem, particularmente para madeiras e cascas de frutos secos, o que sustenta o seu potencial como combustível sólido. A carbonização hidrotérmica, quando comparada diretamente à pirólise, mostrou-se vantajosa em termos de eficiência energética global e redução do teor de cinzas, embora produza sólidos com menor estabilidade térmica e maior heterogeneidade composicional.
- c) Os estudos de co-pirólise indicam que a mistura de biomassa com carvão mineral pode reduzir a energia de ativação do processo e introduzir efeitos sinérgicos que alteram a distribuição e a qualidade dos produtos, o que abre caminhos para estratégias de substituição parcial de combustíveis fósseis em escala industrial.

Diante desse panorama, a casca de macadâmia se apresenta como um resíduo agroindustrial com características estruturais e composicionais que justificam investigação aprofundada. Sua elevada densidade, alto teor de lignina e baixo teor de umidade sugerem um comportamento de pirólise distinto de outras cascas de frutos secos já estudadas, com potencial para geração de biocarvão de alto poder calorífico. Os parâmetros metodológicos identificados nesta revisão fornecem a base necessária para estruturar experimentos que respondam a essas questões de forma rigorosa e comparável à literatura internacional.

Referências bibliográficas

- Aria, M. & Cuccurullo, C. (2017) bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis, *Journal of Informetrics*, 11(4), pp 959-975, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>.
- El-Fawal, E. M., Naggari, A. E. M. A., El-Zahhar, A., Alghandi, M. M., Morshedy, A. S., Sayed, H. E. A. and Mohammed, A. (2025). Biofuel production from waste residuals: comprehensive insights into biomass conversion technologies and engineered biochar applications. *RSC Advances*, 15, pp. 11942 - 11974. [doi: 10.1039/d5ra00857c](https://doi.org/10.1039/d5ra00857c).
- El-Sayed, S., Khass, T. M. and Mostafa, M. E. (2023). Thermal degradation behaviour and chemical kinetic characteristics of biomass pyrolysis using TG/DTG/DTA techniques. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, pp. 17779 - 17803. [doi: 10.1007/s13399-023-03926-2](https://doi.org/10.1007/s13399-023-03926-2).
- Gorshkov, A., Berezikov, N., Kaltaev, A., Yankovsky, S., Slyusarsky, K., Tabakaev, R. and Larionov, K. (2021). Analysis of the Physicochemical Characteristics of Biochar Obtained by Slow Pyrolysis of Nut Shells in a Nitrogen Atmosphere. *Energies*. [doi: 10.3390/en14238075](https://doi.org/10.3390/en14238075).

- Hanandeh, E. A., Albalasmeh, A. and Gharaibeh, M. (2021). Effect of pyrolysis temperature and biomass particle size on the heating value of biocoal and optimization using response surface methodology. *Biomass and Bioenergy*. doi: [10.1016/j.biombioe.2021.106163](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106163).
- Kipngetich, P., Kiplimo, R., Tanui, J. and Chisale, P. (2023). Effects of carbonization on the combustion of rice husks briquettes in a fixed bed. *Cleaner Engineering and Technology*. doi: [10.1016/j.clet.2023.100608](https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100608).
- Lin, L., E, Y., Sun, Q., Chen, Y., Dai, W., Bao, Z., Niu, W. and Meng, J. (2024). Analysis of the Pyrolysis Kinetics, Reaction Mechanisms, and By-Products of Rice Husk and Rice Straw via TG-FTIR and Py-GC/MS. *Molecules*, 30. doi: [10.3390/molecules30010010](https://doi.org/10.3390/molecules30010010).
- Liu, N., Huang, H., Huang, X., Li, R., Feng, J. and Wu, Y. (2024). Co-pyrolysis Behavior of Coal and Biomass: Synergistic Effect and Kinetic Analysis. *ACS Omega*, 9, pp. 31803 - 31813. doi: [10.1021/acsomega.4c03053](https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03053).
- Lozano, E. J., Martín-Lara, M., Blázquez, G., Muñoz-Batista, M. J. and Calero, M. (2026). Enhancing biomass properties for biofuels: A comparative analysis of pyrolysis and hydrothermal carbonization technologies. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. doi: [10.1016/j.jaap.2025.107435](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107435).
- Paudel, P. P., Park, S., Oh, K., Kim, S., Kim, S. Y., Kang, K. and Kim, D. H. (2025). Energy recovery from Ginkgo biloba urban pruning wastes: pyrolysis optimization and fuel property enhancement for high-grade charcoal productions. *Biofuels*, 19. doi: [10.1002/bbb.70017](https://doi.org/10.1002/bbb.70017).
- Rambhatla, N., Panicker, T. F., Mishra, R. K., Manjeshwar, S. K. and Sharma, A. (2024). Biomass pyrolysis for biochar production: Study of kinetics parameters and effect of temperature on biochar yield and its physicochemical properties. *Results in Engineering*. doi: [10.1016/j.rineng.2024.103679](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103679).