

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

IVALDIR JOSÉ TAMAGNO JUNIOR

**BIOENERGIA A PARTIR DA PIRÓLISE DE BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS:
UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

FRANCISCO BELTRÃO

2023

IVALDIR JOSÉ TAMAGNO JUNIOR

**BIOENERGIA A PARTIR DA PIRÓLISE DE BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS:
UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

**Bioenergy from lignocellulosic biomass pyrolysis: a systematic review of the
literature**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientadora: Michele Di Domenico

FRANCISCO BELTRÃO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

IVALDIR JOSÉ TAMAGNO JUNIOR

**BIOENERGIA A PARTIR DA PIRÓLISE DE BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS:
UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 08/Novembro/2023

Michele Di Domenico
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Andriele De Pra Carvalho
Doutorado em Administração
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

José Luiz Francisco Alves
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Federal da Paraíba

“A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação de Curso”

FRANCISCO BELTRÃO

2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de inicialmente agradecer aos meus pais, Marilene e Ivaldir, a todo o apoio durante todo o curso e a minha vida. Vocês são pais maravilhosos que sempre estiveram lá quando eu ou os meus irmãos precisávamos; sem vocês, muito do que nós estamos vivendo hoje não teria acontecido.

Da mesma forma, gostaria de agradecer aos meus irmãos, Iliézer e Igor, que apesar de estarem longe, fazem uma enorme falta. Eu me inspiro muito em vocês e tenho muito respeito e admiração por tudo que fizeram e estão fazendo.

Agradeço a todos os meus amigos que fiz durante este período de 5 anos de curso, são eles: Anna Luiza, Ana Beatriz, Caio, João Vítor, Maurício, Luis Antônio, Thais e Vinícius. Obrigado por me darem a oportunidade de aprender muito com vocês e de conseguirem tornar essa jornada longa e exaustiva em algo mais leve e divertido.

Agradeço ao meu namorado, Renan, por ter feito parte dessa jornada final e que sempre esteve do meu lado me apoiando da forma mais genuína possível. Obrigado por me ajudar a me entender e me apresentar certas novas facetas da vida que antes não sabia que seria possível fazer parte da minha existência.

Agradeço a minha professora orientadora Michele Di Domenico que foi uma enorme ajuda, tanto no pessoal como no acadêmico. Obrigado por ter me ajudado em tantas etapas e me encaminhando tão bem. Foram 2 anos de iniciação científica muito bem aproveitados e de muito conhecimento adquirido que serviram para eu entender que pesquisa em bioenergia é o que desejo para minha carreira futura.

Por fim, agradeço a todos os professores e professoras que fizeram parte da minha vida acadêmica.

RESUMO

Durante muitos anos foram utilizados combustíveis fósseis que durante a sua queima liberam muitos gases que são prejudiciais para o meio ambiente devido a intensificarem o efeito estufa e gerarem um aquecimento anormal ao planeta. Outras fontes de energia vêm sendo estudadas para substituir esses combustíveis finitos, como o caso da biomassa lignocelulósica. Existem muitos processos para realizar esta transformação da biomassa em energia, sendo um dos mais importantes a pirólise, principalmente por ser a etapa inicial de transformações termoquímicas e por gerar três produtos que possuem valor agregado (*biochar*, bio-óleo e biogás). Sendo assim, neste trabalho, foi escrito um artigo de revisão sistemática da literatura para entender como o processo de pirólise funciona e como os parâmetros operacionais (temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento e tamanho de partícula) podem afetar o rendimento e a qualidade dos produtos gerados. Para a revisão, foram selecionados 33 artigos de 542 disponíveis no banco de dados através do uso de um *software* de revisão, o StArt. Como resultado, foi possível identificar as principais tendências dos últimos 10 anos de forma a otimizar o processo da pirólise; dentre elas, tem-se: o uso de pré-tratamentos, diferentes formas de aquecimento (como micro-ondas e energia solar), e a co-pirólise, que é o uso de duas ou mais biomassas ao mesmo tempo. De acordo com artigos estudados, a temperatura foi o parâmetro mais amplamente avaliado. Os autores observaram que com o seu incremento, o rendimento de *biochar* diminui, o bio-óleo atinge uma conversão máxima em temperaturas de 500°C e o biogás aumenta. Além disso, foi observado que as características do *biochar* como área superficial, pH, conteúdo carbonáceo e carbono fixo são alteradas com o aumento da temperatura. Foram destacados usos diferentes para este produto, além do uso como biocombustível, como o sequestro de carbono da atmosfera e regulador de pH do solo. O segundo parâmetro mais avaliado pelos artigos foi a taxa de aquecimento: com o seu aumento, o rendimento do *biochar* é reduzido, e o bio-óleo e o biogás são aumentados. Com o aumento do tamanho de partícula, o *biochar* e o bio-óleo tenderam a aumentar, enquanto o biogás tendeu a diminuir, principalmente pelo fato de quanto maior for o tamanho da partícula, maior será o gradiente interno de temperatura e, conseqüentemente, menos material volátil será despreendida da biomassa. O aumento do tempo de residência ocasiona a diminuição do rendimento do *biochar*, e o aumento do rendimento do bio-óleo e do biogás. Por fim foram identificados outros parâmetros que também podem afetar o rendimento e qualidade dos produtos, dentre eles o fluxo de gás de arraste, a umidade e o tipo de reator.

Palavras-chave: revisão sistemática; processo de pirólise; biomassa residual; parâmetros operacionais; bioprodutos.

ABSTRACT

For many years, fossil fuels were used, which during burning release many gases that are harmful to the environment as they intensify the greenhouse effect and generate abnormal warming of the planet. Other energy sources have been studied to replace these finite fuels, such as lignocellulosic biomass. There are many processes to carry out this transformation of biomass into energy, one of the most important being pyrolysis, mainly because it is the initial stage of thermochemical transformations and because it generates three products that have added value (biochar, bio-oil and biogas). Therefore, in this work, a systematic literature review article was written to understand how the pyrolysis process works and how operational parameters (temperature, residence time, heating rate and particle size) can affect yield and quality of the products generated. For the review, 33 articles were selected from 542 available in the database using review *software*, StArt. As a result, it was possible to identify the main trends of the last 10 years to optimize the pyrolysis process; Among them, there is: the use of pre-treatments, different forms of heating (such as microwaves and solar energy), and co-pyrolysis, which is the use of two or more biomasses at the same time. According to articles studied, temperature was the most widely evaluated parameter. The authors observed that with its increase, the biochar yield decreases, the bio-oil reaches a maximum conversion at temperatures of 500°C and the biogas increases. Furthermore, it was observed that biochar characteristics such as surface area, pH, carbonaceous content and fixed carbon are changed with increasing temperature. Different uses for this product were highlighted, in addition to its use as a biofuel, such as sequestering carbon from the atmosphere and regulating soil pH. The second parameter most evaluated by the articles was the heating rate: with its increase, the biochar yield is reduced, and bio-oil and biogas are increased. With increasing particle size, biochar and bio-oil tended to increase, while biogas tended to decrease, mainly due to the fact that the larger the particle size, the greater the internal temperature gradient and, consequently, less volatile material will be released from the biomass. The increase in residence time causes a decrease in biochar yield, and an increase in bio-oil and biogas yield. Finally, other parameters were identified that can also affect the yield and quality of the products, including the carrier gas flow, humidity and type of reactor.

Keywords: systematic review; pyrolysis process; residual biomass; operational parameters; bioproducts

LISTA DE SÍMBOLOS

CO ₂	Dióxido de Carbono
CO	Monóxido de Carbono
H ₂	Gás hidrogênio
CH ₄	Metano
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
SO _x	Óxidos de Enxofre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	METODOLOGIA	16
2.1	Análise Exploratória.....	17
2.2	Planejamento	18
2.3	Seleção e Classificação	18
2.4	Sumarização e Relatório	19
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
3.1	Resultados do processo da revisão sistemática.....	19
3.2	Efeito da temperatura.....	22
3.3	Efeito da taxa de aquecimento	27
3.4	Efeito do tamanho de partícula	30
3.5	Efeito do tempo de residência.....	33
3.6	Efeito de outros parâmetros	35
4	CONCLUSÃO	38
5	REFERÊNCIAS.....	40
	APÊNDICE A – DADOS DAS VARIAÇÕES NOS PARÂMETROS COM OS RESPECTIVOS RENDIMENTOS DOS PRODUTOS NO PROCESSO DA PIRÓLISE AVALIADOS PELOS ARTIGOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA	44
	APÊNDICE B – DADOS DAS BIOMASSAS E SUAS RESPECTIVAS ANÁLISES IMEDIATA, ELEMENTAR E QUÍMICA DISPONÍVEIS NOS ARTIGOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA	60

EFEITO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS NO REDIMENTO DOS PRODUTOS DA PIRÓLISE DE BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

RESUMO

Por muitos anos, diferentes formas de se gerar energia limpa vêm sendo estudadas no mundo. Uma das apostas promissoras para conseguir realizar a substituição das fontes fósseis são as biomassas lignocelulósicas. Elas se destacam por apresentarem uma estrutura complexa, composta de biopolímeros (celulose, hemicelulose e lignina) que geram uma enorme gama de produtos renováveis. Algumas formas de transformação dessas biomassas são utilizadas, contudo, a que apresenta maior interesse é a pirólise. Neste trabalho, os parâmetros de operação principais do processo de pirólise, como temperatura, taxa de aquecimento, tamanho de partícula e tempo de residência, foram analisados para entender seu impacto na produção dos três produtos valiosos: *biochar*, bio-óleo e biogás. Dessa forma, esta revisão sistemática, que incluiu 33 artigos selecionados a partir de um banco de dados (*Science Direct*), identificou tendências recentes (últimos 13 anos), baseados em todos os artigos retirados do banco de dados, como pré-tratamento, uso de micro-ondas, energia solar e co-pirólise. A temperatura foi o parâmetro mais estudado: notou-se que seu aumento resulta na diminuição do rendimento de *biochar*, aumento do biogás e um rendimento máximo de bio-óleo em temperatura em torno de 500°C. Também se notou que as propriedades do *biochar* como a área superficial, pH, teor de carbono e teor de carbono fixo, sofrem modificações com o aumento da temperatura. Outros parâmetros, como taxa de aquecimento, tamanho de partícula e tempo de residência, também afetaram o rendimento dos produtos. Nesta revisão da literatura foi possível observar a importância de outros parâmetros da pirólise como o fluxo de gás de arraste, a umidade e tipo de reator no processo de pirólise da biomassa.

Palavras-chave: revisão sistemática; biomassa lignocelulósica; pirólise

ABSTRACT

For many years, different ways of generating clean energy have been studied around the world. One of the promising bets to be able to replace fossil sources is

lignocellulosic biomass. They stand out because they have a complex structure, composed of biopolymers (cellulose, hemicellulose and lignin) that generate a huge range of renewable products. Some forms of transformation of these biomasses are used, however, the one that is currently of greatest interest is pyrolysis. In this work, the main operating parameters of the pyrolysis process, such as temperature, heating rate, particle size and residence time, were analyzed to understand their impact on the production of the three valuable products: biochar, bio-oil and biogas. Thus, this systematic review, which included 33 articles selected from a database (Science Direct), identified recent trends (last 13 years), based on all articles extract from the database, such as pre-treatment, use of microwaves, solar energy and co-pyrolysis. Temperature was the most studied parameter: it was noted that its increase results in a decrease in biochar yield, an increase in biogas and a maximum yield of bio-oil at temperatures around 500°C. It was also noted that the properties of biochar, such as surface area, pH, carbon content and fixed carbon content, undergo changes with increasing temperature. Other parameters, such as heating rate, particle size and residence time, also affected the yield of the products. In this literature review, it was possible to observe the importance of other pyrolysis parameters such as carrier gas flow, humidity and type of reactor in the biomass pyrolysis process.

Keywords: systematic review; lignocellulosic biomass; pyrolysis

1 INTRODUÇÃO

A humanidade teve um aumento em seu crescimento econômico e de modos de produção durante o século XVIII com a revolução industrial. Durante esse evento, foram desenvolvidas tecnologias antes nem pensadas, como por exemplo, a máquina à vapor, que utilizava a queima do carvão como fonte de energia. Com essa evolução, o carvão passou a ser utilizado de uma forma exacerbada devido ao seu alto potencial energético. Contudo, naquela época, não se possuía noção dos impactos que esta fonte de energia não renovável poderia acarretar ao planeta.

Durante quase 200 anos foram lançados ao meio ambiente toneladas e mais toneladas de gases nocivos sem o mínimo conhecimento de que no futuro isso poderia gerar a intensificação do efeito estufa causando um aquecimento antinatural ao planeta. Diversos acordos foram estabelecidos durante os anos para tentar minimizar este efeito e procurar soluções sendo eles: protocolo de Kyoto (Brasil, 2004), criado

no século XX, Acordo de Paris (Brasil, 2015) realizado em dezembro de 2015 e diversas Conferências das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP's).

A matriz energética mundial, segundo o IEA (International Energy Agency) (2020), ainda está baseada em fontes fósseis como o carvão (26,78%), o petróleo (30,90%) e o gás natural (23,22%). As quantidades de uso de energias limpas são mais baixas como o caso da energia hídrica (2,51%), da biomassa (9,37%), nuclear (5,02%) e solar, eólica e outras (2,21%). Com isso, as fontes renováveis com menor emissão de gases do efeito estufa, têm sido cada vez mais estudadas para entender suas vantagens e desvantagens e, principalmente, quão efetivas estas são em relação às fontes fósseis.

A biomassa lignocelulósica é uma das apostas mundiais em substituição de combustíveis fósseis. O caráter renovável das biomassas se deve à sua origem, uma vez que normalmente provêm de plantas, as quais são capazes de absorver o CO₂ emitindo pela queima da biomassa, gerando um ciclo do carbono neutro. Essas biomassas são compostas essencialmente por cinco elementos, dos quais quatro são de origem orgânica (extrativos, lignina, hemicelulose e celulose) e um é mineral (cinzas). Esse tipo de biomassa tem surgido como uma alternativa aos combustíveis fósseis, como carvão e petróleo, devido à sua complexa estrutura, que, dependendo do processo de conversão, pode resultar em diversos produtos distintos. Esses produtos, por sua vez, possuem valor agregado e um considerável potencial energético (Zhou *et al.*, 2011).

A celulose é o composto mais abundante em uma biomassa lignocelulósica, constituindo entre 35-50% do material (Zhou *et al.*, 2011). Ela é um polímero macromolecular com monômeros de glucose, com fórmula química genérica (C₆H₁₂O₅)_n e possui uma configuração linear e estrutura cristalina (Lin *et al.*, 2022). A hemicelulose é o segundo composto mais abundante nestas biomassas, na qual apresenta uma quantidade que também é variável entre 20-35% (Zhou *et al.*, 2011). Este composto encontra-se na superfície das microfibras da celulose, mas, diferente dessa, a hemicelulose não possui monômeros iguais, ou seja, ela possui vários polissacarídeos, como xilose, galactose, arabinose, manose e glucose em sua estrutura gerando assim uma molécula amorfa (Naik; Poonia; Chaudhari, 2021). Em terceiro lugar, em questão de composição, está a lignina, que pode variar entre 15-25% (Zhou *et al.*, 2011). Dentre os outros componentes, ela é a que apresenta uma complexidade maior em relação à sua estrutura.

Para aproveitamento das biomassas para a geração de produtos e de energia é necessário que elas passem por um ou mais processos de transformações. As principais classes de conversão são: as conversões termoquímicas como o caso da combustão, gaseificação e pirólise; as conversões físico-químicas como a produção de biodiesel; e a conversão biológica que utiliza microrganismo ou enzimas para modificar a matéria-prima. Dentre todos os processos termoquímicos de conversão, a pirólise apresenta-se como o método mais eficaz para a produção de produtos com alto valor energético, principalmente por ser o primeiro processo de outros métodos de conversão térmica como o caso da gaseificação e combustão (Pang *et al.*, 2021).

A pirólise é um processo muito antigo. O Egito antigo e os macedônios já usavam produtos pirolíticos, como o caso do alcatrão da madeira, para alguns processos. No final do século XVIII, o processo de aproveitamento dos produtos gerados pela pirólise já estava relativamente bem desenvolvido. Contudo, com o crescimento das indústrias de petróleo no século XX, os processos de pirólise acabaram perdendo grande desenvolvimento e as pesquisas só retornaram quando ocorreu a crise do petróleo na década de 70 e a intensificação dos estudos e comercialização de reatores de pirólise rápida nos anos 80 (Garcia-Nunez *et al.*, 2017).

O foco principal dos processos de transformação térmica é gerar produtos com valor agregado e com um alto potencial energético. Dessa a forma, a pirólise produz três produtos: o bio-óleo, o *biochar* e o biogás. Para a formação desses produtos é necessário entender a composição da biomassa, o tipo de pirólise utilizada e suas condições, e as reações que ocorrem no processo de degradação da matéria-prima.

O bio-óleo, também conhecido como líquido pirolítico, apesar de possuir este nome, possui altos índices de compostos oxigenados que dão um caráter polar a este composto (Bridgwater; Meier; Radlein, 1999). Sua aparência é de um líquido marrom escuro que pode possuir alguma quantidade de partículas sólidas suspensas. Em suas características, o líquido pirolítico possui um poder calorífico superior baixo que normalmente varia entre 15 e 20 MJ kg⁻¹ e seu pH é ácido com valores na faixa de 2,0 – 3,7 (Kan; Strezov; Evans, 2016). Estas características mostram certas desvantagens que esse produto apresenta, como uma alta corrosão, conteúdo sólido indesejável, instabilidade química e volatilidade incompleta; porém, situações como essas podem

ser revertidas com alguns processos físicos ou químicos de transformação (Czernik; Bridgwater, 2004).

As principais aplicações do bio-óleo estão na utilização com fins energéticos, como combustível em motores a diesel, combustível em turbinas e combustível para veículos de transporte. Além disso, ele pode ser usado como matéria-prima para produção de produtos químicos, como fenóis, produção de aditivos que podem ser usados em indústrias farmacêuticas e de fertilizantes e, até mesmo, como flavorizantes na indústria alimentícia (Balat, 2011; Czernik; Bridgwater, 2004).

O *biochar* é o produto sólido carbonoso do processo de pirólise. Sua composição é formada por compostos não voláteis ou resíduo que não foram totalmente decompostos, além de compostos minerais. Em suas características, o *biochar* apresenta altos valores de poder calorífico superior, que podem variar entre 21,4 – 33,2 MJ kg⁻¹ (Demirbas, 2004). Estes valores podem ser comparados até à carvões minerais que possuem valores entre 16 - 34 MJ kg⁻¹ (Domenico *et al.*, 2019). Ademais, o *biochar* possui uma estrutura porosa, com caráter básico ou ácido, dependendo da biomassa usada.

Os usos mais comuns do *biochar*, além do seu atrativo energético forte, incluem a utilização como adsorvente natural, podendo ser usado como regulador de solos, por certas vezes possuir uma quantidade grande de nitrogênio, fósforo e pH alcalino. Além disso, o *biochar* pode sequestrar carbono e outros gases da atmosfera que são prejudiciais para o aquecimento global (Kan; Strezov; Evans, 2016; Mong *et al.*, 2022).

O biogás gerado no processo da pirólise tem em sua composição dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrogênio, hidrocarbonetos leves (como o metano, etano e etileno) e alguns compostos como propano, amônia, óxidos de nitrogênio e óxidos de enxofre (Kan; Strezov; Evans, 2016). Esta composição, principalmente devido à presença de CO, CO₂, NO_x e SO_x, não pode ser usada em sua totalidade para a produção de energia, pois esses gases são os principais causadores do efeito estufa (Mong *et al.*, 2022).

Apesar do exposto, o biogás possui algumas aplicações dos demais gases presentes, como produção de calor e eletricidade. Além disso, o hidrogênio gerado pode ser reutilizado em outro processo, por apresentar um alto desempenho como combustível gasoso. Outras aplicações incluem a reutilização como gases de arraste

nos reatores de pirólise ou ainda no aquecimento do gás inerte do processo (Kan; Strezov; Evans, 2016).

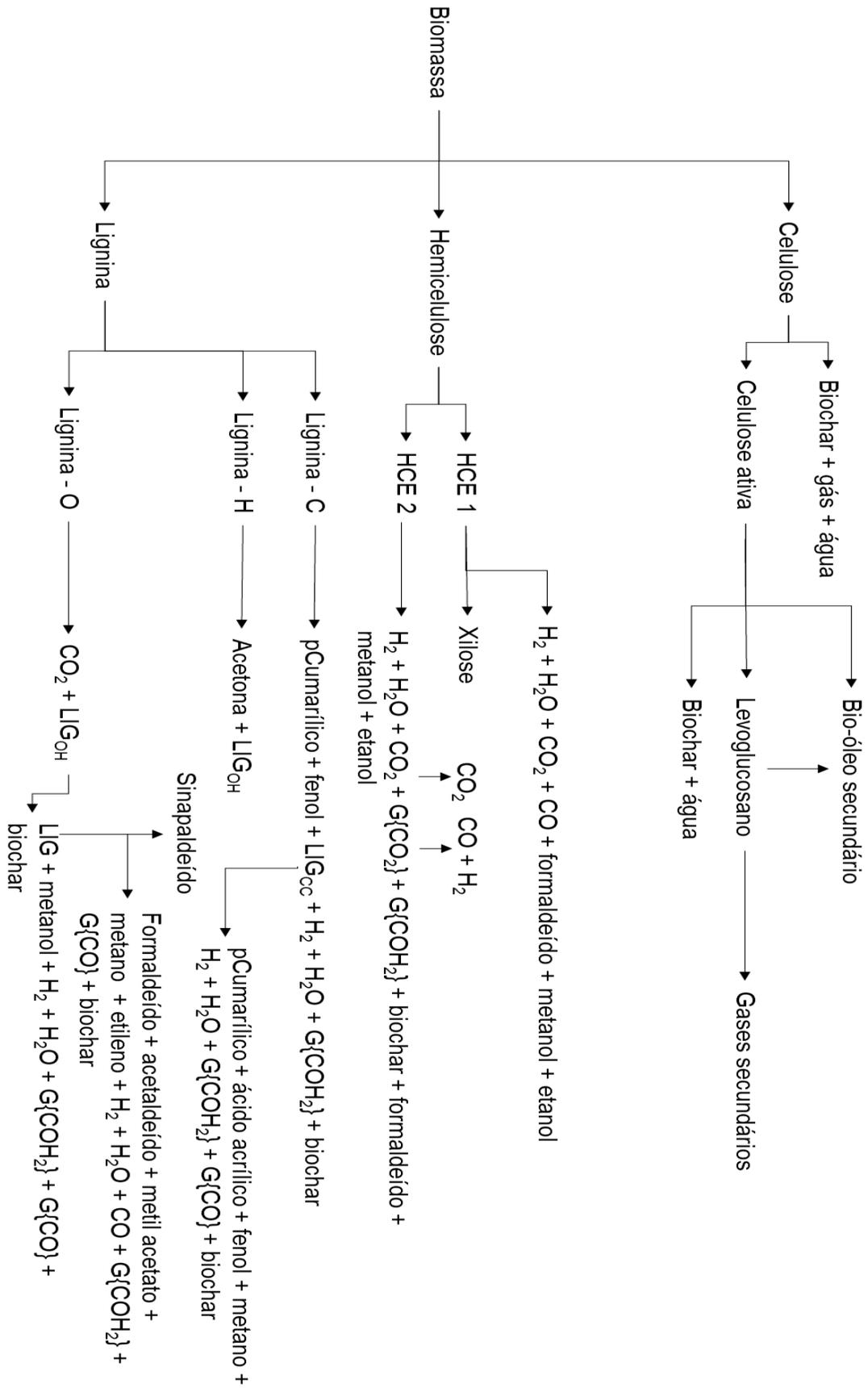
A formação dos produtos depende de uma série de reações de conversões do compostos lignocelulósicos. O processo para a formação dos produtos segue três principais passos: a formação do *biochar*, despolimerização e desintegração. O primeiro processo consiste em fazer a ligação entre as estruturas de carbonos dos biopolímeros liberando material volátil até se obter uma estrutura organizada e cíclica, o *biochar*. Este processo vai ocorrer a temperaturas menores de 500°C. O segundo processo é quando a temperatura e a taxa de aquecimento aumentam e os compostos poliméricos acabam tornando-se monômeros. O processo final consiste em fragmentar moléculas maiores, anteriormente formadas, em moléculas menores de gases não condensáveis. Este processo ocorre em temperaturas acima de 600°C (Vuppaladiyam *et al.*, 2023).

Os mecanismos individuais de transformação de cada composto das biomassas lignocelulósicas é de extrema importância para entender o processo da formação dos produtos. Na Figura 1 é possível observar todo os mecanismos de reação que gerarão os produtos da pirólise. A celulose, inicialmente sofre uma reação de desidratação para formação inicial de água e *biochar* (Diebold, 1994) e uma reação de despolimerização que se inicia em temperaturas baixas, entre 100°C e 150°C (Lin *et al.*, 2009). Essa reação dará origem a celulosa ativa, a qual sofrerá duas reações simultâneas e competitivas: a fragmentação que dará origem a compostos carbonados com baixa massa molecular que formam o bio-óleo secundário; e a transglicosilação que dará origem ao levaglicosano (bio-óleo primário) que posteriormente será degradado em gases mais leves e no bio-óleo secundário. Ambos os produtos dos processos sofrem reações secundárias de craqueamento e de carbonização, as quais vão gerar gases leves (H₂, CO₂, CO), água, hidrocarbonetos poli-aromáticos e *biochar* (Vuppaladiyam *et al.*, 2023).

A pirólise da hemicelulose tem suas reações muito parecidas com a da celulose, porém ocorrem em temperaturas mais baixas. HCE 1 e HCE 2 representam reações na matriz do sólido de etapas de vaporização e/ou degradação (Cuoci *et al.*, 2007). No processo inicial ocorrem reações competitivas de formação de açúcares (xilose), e a fragmentação. Posteriormente, a xilose começa a se degradar e, devido a sua estrutura, composta de ácido acético, furfural, começam a surgir CO₂, CO e H₂O (Anca-Couce, 2016).

A lignina pode apresentar mecanismos diferentes dependendo da sua composição. Os três tipos mais comuns são: a lignina - C, lignina - H e lignina - O; esta classificação se relaciona com a predominância de compostos de carbono, hidrogênio e oxigênio, respectivamente. O processo de degradação da lignina inicia-se com a formação de um radical fenoxil e um radical secundário alquilaromático. Posteriormente, os radicais começam a fase de propagação com reações de H-permutação, a qual começam a formar moléculas mais estáveis. Radicais de OH⁻¹ presentes no meio reagem com os radicais da lignina ocasionando uma desidratação inicial da sua estrutura com um aumento no grau de insaturação gerando as moléculas de cumarílico e sinapaldeído. Por fim, em temperaturas acima de 500°C, começam se formar uma grande quantidade de hidrocarbonetos poli-aromáticos, algumas reações de condensação intra e intermoleculares ocasionam uma redução do conteúdo de O e H, o que acaba gerando a estrutura cíclica do *biochar*. Além disso, devido a vários processos de desidratação, de disponibilidade de radicais H e liberação de O, gases mais leves, como CO₂, CO e H₂ são formados (Faravelli *et al.*, 2010).

Figura 1 - Esquema de reação de pirólise da biomassa lignocelulósica



Fonte: Adaptado de Pang *et al.* (2021)

O rendimento dos produtos gerados, assim como a sua qualidade, é afetado pelos parâmetros operacionais do processo da pirólise. Os principais parâmetros são a taxa de aquecimento, o tempo de residência, o tamanho de partícula da matéria-prima carbonosa e a faixa de temperatura de reação. A temperatura e o tempo de residência são os fatores que mais afetam o rendimento dos produtos (Ngo; Kim; Kim, 2014). Contudo, alguns outros parâmetros se tornam importantes de se destacar como o fluxo de gás de arraste, a pressão do interior do reator, o tipo de reator e suas especificações.

Assim, o propósito deste estudo consiste na escolha de artigos da literatura através de uma revisão sistemática centrada na pirólise de biomassa lignocelulósica e identificar possíveis lacuna e tendência para trabalhos futuros. A seleção dos artigos foi orientada pela avaliação do impacto das propriedades da biomassa e dos parâmetros operacionais do processo na composição dos produtos resultantes, objetivando esclarecer quais artigos foram escolhidos, quantos deles, a razão pela qual estes são fundamentais para esta revisão e como os parâmetros avaliados nestes artigos afetam a qualidade e o rendimento dos três produtos da pirólise.

2 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos deste estudo foi utilizado a revisão sistemática seguindo o método adaptado por Biolchini *et al.* (2005) e Kitchenham (2004), o qual separa o processo de produção da revisão em três etapas:

1. Definir o Escopo e Objetivos do Estudo: Inicialmente, é essencial delinear claramente o problema de pesquisa, identificar os objetivos do estudo dentro desse contexto e realizar uma busca criteriosa de materiais que estejam alinhados com o escopo desejado.
2. Selecionar e Aplicar Critérios de Filtragem: Nesta fase, procede-se à seleção e filtragem dos estudos identificados, estabelecendo critérios que determinam a proximidade de cada estudo em relação aos objetivos do trabalho. Isso assegura que somente estudos pertinentes sejam incluídos na revisão.
3. Relacionar e Integrar na Apresentação dos Resultados: Após a seleção dos artigos relevantes, é crucial estabelecer conexões entre eles e

incorporá-los de maneira coerente ao texto que apresenta os resultados do trabalho. Isso envolve a organização dos estudos de forma a contribuir para a resposta às questões de pesquisa e os objetivos estabelecidos.

O processo de revisão sistemática foi conduzido com o auxílio do *software* gratuito StArt, desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de *Software* (LaPES) da UFSCar (Universidade Federal de São Carlos). O *software* foi utilizado para sintetizar e organizar as etapas do processo de revisão, facilitando a geração de material relevante. As etapas do processo são descritas a seguir.

2.1 Análise Exploratória

Antes de iniciar a revisão sistemática, foi realizada uma busca preliminar para identificar artigos-base com conteúdo relevante para este trabalho. Estes artigos-base ajudaram a definir as palavras-chave, a partir da identificação de quais eram as principais palavras utilizadas no título, no resumo e nas palavras-chave dos artigos. Sendo assim, as que mais se repetiam foram usadas na busca final dos artigos da revisão sistemática. Essa etapa, chamada de análise exploratória, precedeu as etapas subsequentes do método.

Durante a análise exploratória, foram identificados quatro artigos-base relevantes para a revisão: Sugarcane bagasse pyrolysis: *A review of operating conditions and products properties* (Toscano Miranda *et al.*, 2021); *The influence of lignocellulose on biomass pyrolysis product distribution and economics via steady state process simulation* (Pang *et al.*, 2021); *Pyrolysis of grape bagasse: Effect of pyrolysis conditions on the product yields and characterization of the liquid product* (Demiral; Ayan, 2011); *Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters* (Kan; Strezov; Evans, 2016).

A partir desses artigos, uma *string* de palavras-chave foi desenvolvida, incluindo *pyrolysis AND (bio-oil OR liquid) AND gas AND (biochar OR solid) AND yield*. Foi feita uma escolha mais ampla das palavras-chave para não limitar a pesquisa excessivamente, pois percebeu-se que restrições mais rígidas poderiam levar à exclusão de artigos potencialmente valiosos para a revisão. A escolha de não especificar o tipo de biomassa também foi adotada.

2.2 Planejamento

Nesta fase, foi preenchido um protocolo que estabeleceu o objetivo da revisão de forma clara e concisa. O objetivo principal era realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a pirólise de biomassas lignocelulósicas, com foco na avaliação do impacto dos parâmetros operacionais do processo na composição dos produtos gerados. Foi formulada uma pergunta orientadora que identificava o que seria buscado nos artigos: "Como as características das biomassas e os parâmetros de processo afetam o rendimento e a composição dos produtos gerados por pirólise?". Além disso, as bases de dados utilizadas para a pesquisa foram especificadas, com destaque para o *Science Direct*. Foram estabelecidos critérios de exclusão, que incluíram características como a natureza das biomassas, processos de co-pirólise, pirólise catalisada, pirólise fotocatalisada, pirólise por micro-ondas e artigos que não se concentravam no processo pirolítico. Além disso, artigos anteriores a 2010 foram excluídos, pois notou-se que a quantidade de artigos que abordavam a pirólise de biomassa lignocelulósica anterior a este ano era muito menor do que os artigos a partir dele, ademais não traziam informações novas para o tema.

2.3 Seleção e Classificação

Os artigos da base de dados foram coletados e submetidos aos critérios de exclusão estabelecidos. Durante a seleção, foram extraídos dados adicionais, como o tipo de biomassa usada no estudo, os parâmetros avaliados, o tipo de atmosfera de reação e o tipo de reator. A classificação dos artigos foi determinada com base na extensão da avaliação realizada, com categorias de "muito baixo", "baixo", "alto" e "muito alto", com base na quantidade de parâmetros avaliados.

Inicialmente, a partir da *string* de palavras-chave anterior, 542 artigos foram exportados para o *software*. Durante a etapa de seleção, 405 artigos foram descartados após a leitura do título e do resumo, devido à presença de critérios de exclusão conforme planejado, resultando em 137 artigos restantes.

Nesta etapa, apenas 33 dos 137 artigos selecionados foram usados na revisão sistemática. Isso ocorreu porque, durante a leitura dos artigos, alguns critérios de exclusão não estavam explícitos nos títulos e resumos. Além disso, percebeu-se que os artigos encontrados apresentam uma certa tendência aos resultados pretendidos. Sendo assim, optou-se por priorizar os artigos que possuíam mais

parâmetros avaliados para englobar a maior quantidade de resultados possíveis e entender como eles se correlacionavam, uma vez que a pirólise é um processo complexo onde pequenas variações podem ocasionar grandes alterações nos produtos gerados. O foco desta revisão foi compreender como os parâmetros afetam a transformação térmica, e, portanto, estudos contendo a análise de mais parâmetros foram considerados mais valiosos.

2.4 Sumarização e Relatório

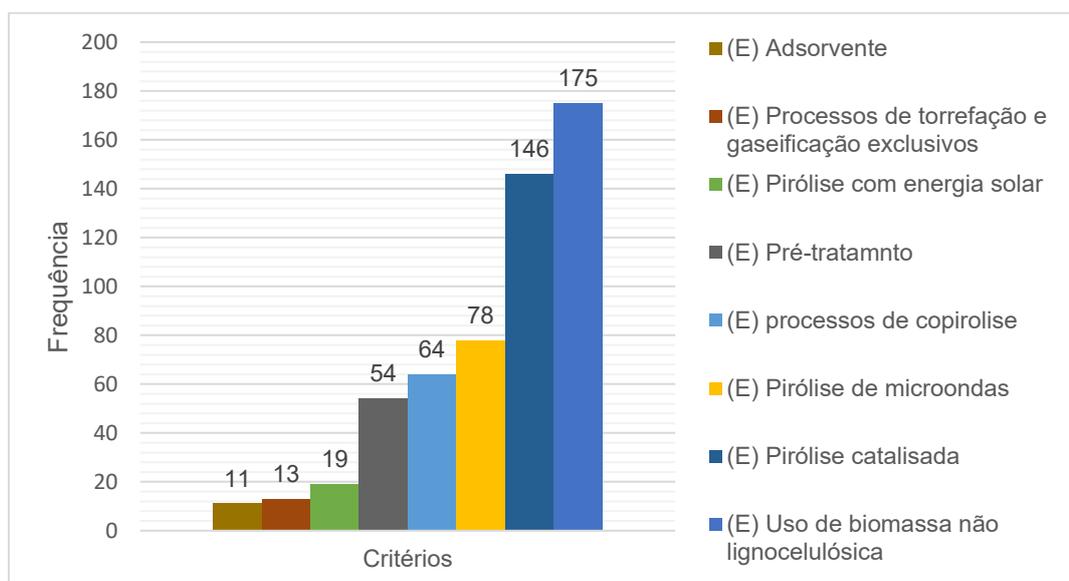
Na etapa final, houve outra rodada de exclusão de artigos, com a exclusão daqueles classificados como "muito baixo" e "baixo" na seleção. Os artigos selecionados foram então usados para criar uma tabela que continha informações essenciais, como referências dos artigos, nomes das biomassas estudadas, massas usadas, tipos de reatores, parâmetros avaliados, dados da biomassa (análise imediata, elementar e lignocelulósica) e rendimentos de produtos gerados. Esses dados estão disponíveis no Apêndice A (parâmetros da pirólise e rendimento dos produtos) e Apêndice B (dados das biomassas) e foram usados para elaborar os resultados e discussões finais.

O uso do *software* StArt foi fundamental para sistematizar e agilizar o processo de revisão sistemática, garantindo que os critérios de inclusão e exclusão fossem aplicados de forma consistente e permitindo a organização eficaz das informações coletadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados do processo da revisão sistemática

A partir da etapa de seleção e classificação, foi possível criar o Gráfico 1, que ilustra os critérios que mais resultaram em exclusões durante o processo de seleção.

Gráfico 1 – Número de artigos excluídos por critério de exclusão estabelecido

Fonte: Autoria própria (2023)

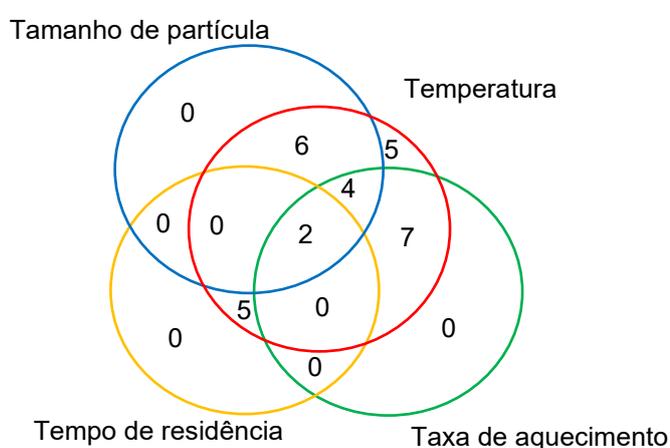
Através da análise do Gráfico 1, foi possível identificar que o principal motivo de exclusão de artigos durante a etapa de seleção foi o uso de biomassa que não é de origem lignocelulósica. Isso é uma observação importante, uma vez que muitos artigos não continham a expressão "biomassa lignocelulósica" em seus títulos e resumos, mas, em vez disso, descreviam o tipo específico de biomassa, como madeira de eucalipto, *Parthenium hysterophorus*, resíduo de café, *Prosopis Juliflora*, etc.

Além disso, a pirólise catalisada e a pirólise por micro-ondas foram a segunda e a terceira razões mais comuns para a rejeição de artigos. Isso sugere uma tendência na pesquisa em pirólise, onde estudos, a partir do ano de 2010, estão explorando novas abordagens, como o uso de catalisadores ou métodos de aquecimento alternativos, como micro-ondas. A presença de catalisadores (adicionados ou não ao processo – como contaminantes da biomassa) frequentemente visa otimizar o processo e melhorar a qualidade e a quantidade dos produtos gerados.

Outras tendências recentes incluem o uso de pré-tratamentos de biomassa e a co-pirólise de várias biomassas, que também resultaram em exclusões durante a seleção. No entanto, esses fatores não foram considerados nesta revisão, uma vez que o foco foi entender o funcionamento básico do processo de pirólise. A ideia era primeiro compreender o processo em sua forma mais fundamental para, posteriormente, analisar oportunidades de melhoria.

Na análise dos principais fatores que afetam a pirólise, os parâmetros mais estudados incluíram o tamanho das partículas, a temperatura, a taxa de aquecimento, o tempo de residência no reator e a vazão de gás inerte (gás de arraste). Além disso, certos parâmetros específicos do tipo de reator também foram abordados nos artigos. Com base nesses dados, um Diagrama de Venn (Figura 2) foi criado para entender quais parâmetros foram mais estudados e quais combinações entre eles foram mais frequentemente encontradas.

Figura 2 – Diagrama de Venn dos parâmetros obtidos na revisão sistemática da literatura



Fonte: Autoria própria (2023)

A análise da Figura 2 fornece informações valiosas sobre os parâmetros investigados na revisão. A temperatura é claramente o parâmetro mais abordado nos artigos, com 29 deles contendo informações sobre como ela influencia o processo de pirólise. Isso é compreensível, uma vez que a temperatura desempenha um papel fundamental na pirólise, um processo termoquímico que depende do calor para degradar a biomassa lignocelulósica. A análise detalhada deste parâmetro é crucial para determinar a temperatura ideal que resulta no rendimento máximo dos produtos desejados.

Em comparação, os outros três parâmetros - tamanho de partícula, razão de aquecimento e tempo de residência - foram abordados em menor escala nos artigos. O tamanho de partícula foi avaliado em 12 artigos, a razão de aquecimento em 14 artigos e o tempo de residência em 7 artigos.

O Diagrama de Venn destaca as combinações de parâmetros mais frequentemente encontradas nos artigos. Comprova-se que as combinações envolvendo apenas dois parâmetros, com inclusão da temperatura, foram as mais comuns. A avaliação conjunta do tamanho de partícula, temperatura e razão de aquecimento ocorreu em apenas 4 artigos. A análise dos quatro parâmetros juntos foi encontrada em somente 2 artigos.

A análise dos dados sugere que a temperatura e a razão de aquecimento são frequentemente analisadas em conjunto. Isso pode ser atribuído ao fato de que a temperatura tem um forte impacto no rendimento dos produtos, enquanto a razão de aquecimento pode ser utilizada para controlar a produção de produtos específicos.

Apesar de a temperatura ter sido inicialmente um critério de exclusão para alguns artigos, 5 deles se concentravam na variação da temperatura. No entanto, esses artigos também introduziam outros parâmetros não incluídos na revisão sistemática, como variação no fluxo de gás inerte ou modos específicos de operação de reatores como observado nos trabalhos de Hasan *et al.* (2017) e Paenpong & Pattiya (2016). Portanto, optou-se por incluí-los na revisão, permitindo análises comparativas mais abrangentes no futuro.

Resumidamente, os dados apresentados na Figura 1 reforçam a importância dos parâmetros identificados na revisão da pirólise. A temperatura e a razão de aquecimento surgem como os focos principais, refletindo seu impacto significativo no processo e nos produtos gerados. A inclusão de artigos que exploram exclusivamente a variação da temperatura, mas introduzem outros parâmetros, amplia o escopo da revisão e permite análises comparativas mais detalhadas.

3.2 Efeito da temperatura

O efeito da temperatura mostrou-se ser o parâmetro mais avaliado nos artigos utilizados para esta revisão. Notou-se uma conclusão muito coesiva de como este parâmetro afeta o rendimento dos produtos.

Segundo Borel *et al.* (2020), ocorre uma variação no rendimento dos produtos gerados na pirólise com a mudança da temperatura, sendo este efeito relacionado com a degradação dos compostos lignocelulósicos presentes na biomassa. Os autores acrescentam que existe uma correlação destes compostos (celulose, hemicelulose e lignina) com o rendimento de cada produto: a hemicelulose está relacionada a formação do biogás, a celulose com o rendimento de bio-óleo e a lignina

se relaciona com a geração do *biochar*. Durante o seu estudo com resíduo da indústria cervejeira notaram que com o aumento da temperatura, o *biochar* tende a diminuir, pois os materiais voláteis se desprendem da biomassa para gerar os demais produtos. Com o aumento da temperatura, o *biochar* também se torna menos polar devido a formação de estruturas aromáticas; dessa forma, quanto maior for a temperaturas mais o *biochar* apresentará um caráter hidrofóbico. Além disso, os autores notaram um efeito positivo do incremento de temperatura quando se trata do poder calorífico do *biochar*, que variou entre 27.1 kJ g⁻¹ até 28.3 kJ g⁻¹. Contudo o teor de cinzas quadruplicou em relação a biomassa de origem, passando de 3,22% para 12,8%. Por fim, observaram que a estrutura do *biochar* é alterada substancialmente em temperaturas bem elevadas, ocorrendo uma fusão dos poros do sólido e consequentemente uma diminuição da sua área de superfície.

Yu *et al.* (2019), que utiliza *Chamaecyparis obtusa* como biomassa, descreveram que o aumento da temperatura de 350°C até 600°C, resulta na diminuição da formação do *biochar* em 12 % em massa. A elevação da temperatura tende a aumentar o conteúdo carbonáceo do sólido pois O e H são volatilizados. Em acréscimo ao trabalho de Borel *et al.* (2020), Yu *et al.* (2019) também notaram um aumento do teor de carbono fixo, uma vez que se gera uma estrutura aromático e quimicamente mais estável, conforme já descrito acima. Apesar de o *biochar* apresentar ótimas características para um processo de combustão, os autores demonstram que as propriedades deste produto pirolítico podem ser aproveitadas de forma mais nobre ou até mesmo mais viável economicamente, como por exemplo, como absorvente ou até mesmo regulador de pH de solo ácido, devido a sua alcalinidade.

Em relação ao bio-óleo, Yu *et al.* (2019) apresentaram uma visão de que o produto líquido, a água e os gases não condensáveis (biogás) podem ser considerados subprodutos em relação ao *biochar*, sendo este, então, o produto mais importante. O estudo ainda aponta um rendimento crescente de bio-óleo com o incremento de temperatura até 600°C, com valor máximo de 63,8%. Este produto líquido apresentou uma grande quantidade de água em sua composição (44,3-48,4%), reduzindo seu valor como combustível. De acordo com os autores, a principal composição do bio-óleo foi de ácido acético, acetol, fenol e levoglucosano. Em relação aos gases não condensáveis, estes tiveram um rendimento de comportamento linear crescente com o aumento da temperatura. Já, em relação a sua composição, os

autores afirmam que no início do processo de pirólise se tem uma maior formação dos gases CO_2 e CO , e, com o aumento da temperatura para 450°C , ocorre um rápido aumento na concentração de CH_4 , além do surgimento de H_2 (em baixas concentrações) para temperaturas mais elevadas.

Abbas *et al.* (2018) verificaram tendências semelhantes aos trabalhos citados em relação ao rendimento de *biochar* quando usado a casca de arroz. Contudo, notaram um rápido decréscimo (de quase 20%) no rendimento deste sólido em temperaturas de 300°C até 500°C , acima destas temperaturas o decréscimo foi menor de 2%. A justificativa apresentada foi o término da degradação dos componentes presentes em grandes quantidades, como a celulose e a hemicelulose. Tan, Abdullah e Hameed (2017) demonstram este comportamento em seu trabalho, afirmando que, conforme já descrito, as etapas de pirólise se relacionam diretamente com as temperaturas de degradação dos compostos lignocelulósicos da biomassa. A hemicelulose é a primeira a começar a sua degradação, a qual ocorre entre 220 - 315°C . Em seguida, celulose é degradada em temperaturas na faixa de 315 - 400°C . Por fim, a lignina degrada-se de forma substancial, mesmo que sua degradação ocorra desde o início até o final do processo, ou seja, entre 160°C e 900°C . Assim como descrito nos outros estudos, Abbas *et al.* (2018) verificaram o aumento no teor de carbono fixo com o incremento de temperatura. A partir dessa informação, destaca-se mais uma possível utilização do *biochar* que é o sequestro de carbono da atmosfera (captura de CO_2) já que o carbono fixo está diretamente ligado a estabilidade do sólido.

No estudo de Abbas *et al.* (2018), o bio-óleo apresentou um crescimento até a temperatura de 500°C , com rendimento máximo de 18,72%; a partir desta temperatura, ocorreu um decréscimo constante até 17,84% em 700°C . A justificativa utilizada foi que com o aumento da temperatura a reação de craqueamento secundário dos gases condensáveis em gases não condensáveis (CH_4 , H_2 , CO , CO_2) é facilitada, diminuindo o rendimento do produto líquido. Consequentemente, o rendimento do produto gasoso (biogás) tende a aumentar, como apresentado no estudo de Yu *et al.* (2019).

Gupta, Gupta e Mondal (2019), os quais estudaram a pirólise de serragem de *Tectona grandis*, identificaram uma mudança importante na área superficial da estrutura do *biochar* com a variação da temperatura; lembrando que essa característica é muito importante no caso de se utilizar o sólido como adsorvente.

Sendo assim, eles observaram que em temperaturas de 400-500°C a área superficial é bem menor (2,4164 - 6,8990 m² g⁻¹) quando comparada à de 600°C (253,6631 m² g⁻¹). Segundo eles, o comportamento em baixas temperaturas ocorre pois ainda não se teve a completa carbonização do *biochar*, com a presença de matéria orgânica no produto. Contudo, com o aumento da temperatura para 700°C, teve-se uma queda na área superficial como observado por Borel *et al.* (2020). Açikalin e Karaca (2017) trazem mais informações referentes a área superficial, indicando seu experimento que temperaturas medianas de 500°C produzem uma superfície mais uniforme e organizada quando comparado com temperaturas inferiores. O bio-óleo no estudo de Gupta, Gupta e Mondal (2019) teve seu valor máximo de rendimento (48,8%) em 600°C.

A composição do bio-óleo é muito diversa e complexa, contudo, Yu, Liu e Millan (2023) afirmam que os principais componentes do bio-óleo são álcoois, ácidos, ésteres, aldeídos, cetonas, furanos, fenóis e açúcares. Com o aumento da temperatura, os compostos fenólicos, açúcares e ácidos diminuem, enquanto álcoois e aldeídos tendem a aumentar. Ademais, cetonas e furanos aumentam, enquanto ésteres diminuem. Isso ocorre pois com o aumento da temperatura ocorre a decomposição da celulose e da lignina. Além disso, o estudo mostra que com o aumento da temperatura a massa molar do bio-óleo tende a diminuir, devido principalmente esta quebra de compostos mais pesados como açúcares e fenóis em compostos mais leves como álcoois e cetonas.

Gupta, Gupta e Mondal (2019) apresentam um aumento de 6% no rendimento de biogás com a elevação da temperatura 400 a 700°C. Os autores ainda apontam que em temperaturas mais baixas, a principal composição do gás formado é CO e CO₂, devido a degradação inicial da hemicelulose e da celulose; pois, como demonstrado por Tan, Abdullah e Hameed (2017), a degradação destes compostos ocorre por volta dos 400°C. Gupta, Gupta e Mondal (2019) acrescentam que a quantidade de CO diminui de 21,23 mol% para 9,31 mol% com o aumento da temperatura, fato este que não ocorre para o CO₂ pois a degradação da lignina também gera este gás. A concentração de metano no gás formado possui comportamento semelhante ao rendimento do bio-óleo, atingindo um pico na temperatura de 600°C. Por fim, o gás hidrogênio é gerado principalmente com a degradação de compostos da lignina. Outros autores também observaram o padrão apresentado para a composição do biogás, como Yu, Liu e Millan (2023) e Tan,

Abdullah e Hameed (2017). Este último, traz um esquema do caminho de formação dos principais gases. Na degradação da lignina têm-se $\text{CO}_2 > \text{H}_2 > \text{CH}_4 > \text{CO} > \text{C}_{2+}$, para a hemicelulose tem-se $\text{CO} > \text{CO}_2 > \text{CH}_4 > \text{C}_{2+} > \text{H}_2$ e para a celulose $\text{CO}_2 > \text{CO} > \text{CH}_4 > \text{C}_{2+} > \text{H}_2$.

Para Tan, Abdullah e Hameed (2017), o bio-óleo de casca de *Durrio zabethinus Linn*, teve seu maior rendimento em 650°C (57,45% em massa); contudo, os autores, não avaliaram temperaturas superiores de forma a observarem a queda de rendimento após o pico máximo. Os autores apresentam que temperaturas mais altas de pirólise conduzem a mais compostos orgânicos volatilizados, como o caso de extrativos e proteínas, fazendo com que o rendimento de produtos líquidos e gasosos seja maior.

Soni e Karmee (2020) trouxeram uma proposta de averiguar as diferenças entre os tipos de reatores mais utilizados para o processo de pirólise da serragem de madeira: batelada e contínuo. Conforme relatado pelos autores, ocorreu uma queda no rendimento em *biochar* e um aumento no rendimento de biogás com o aumento da temperatura, e este comportamento foi observado para ambos os tipos de reatores. Contudo, verificou-se uma menor geração de *biochar* e de biogás para o reator contínuo em comparação ao reator batelada. Segundo os autores, a redução descrita ocorreu devido ao aumento na formação de bio-óleo em 6,15%. Os autores ainda justificam que, independentemente do tipo de reator, o *biochar* serve como um catalisador para as reações de craqueamento secundárias do bio-óleo, devido a sua alta porosidade. Contudo, essas reações são minimizadas em reatores de sistema contínuo, devido à constante remoção de *biochar* do reator, fazendo com que o rendimento do bio-óleo se torne maior.

Chandrasekaran, Ramachandran e Subbiah (2018) obtiveram as mesmas tendências em relação ao efeito da temperatura nos produtos da pirólise da madeira de *Prosopis juliflora*. Os autores destacaram que a qualidade do *biochar* pode ser relativa ao seu uso: assim como supracitado, o aumento da temperatura gera um *biochar* com maior teor de carbono fixo e cinzas, menor teor de material volátil e caráter mais alcalino. Em relação ao bio-óleo, os autores trazem informações sobre sua aplicação, indicando que quanto maior a quantidade de fenóis em sua composição, mais indicado é este produto para uso em indústrias farmacêuticas e alimentícias. Outro fator destacado, foi de que a composição do bio-óleo se baseia em cetonas, ácido acético e vários compostos fenólicos. Como visto anteriormente, a

quantidade de ácido é reduzida com o aumento da temperatura e sua presença torna-se um ponto negativo quando em excesso, pois são os compostos ácidos que dão o caráter corrosivo do bio-óleo.

Hosseinzai *et al.* (2022) avaliaram diferentes biomassas (cascas de pistache, pétalas de açafreão e casca de laranja) e apresentaram, novamente, tendências semelhantes, onde: o *biochar* diminui com o aumento da temperatura devido a perda de material volátil; o bio-óleo tem seu rendimento máximo em temperaturas em torno de 500°C; e o biogás é mais produzido com o aumento da temperatura devido ao processo de reações de craqueamento secundárias. Contudo, o estudo mostra que há uma variação no rendimento dos produtos de acordo com o tipo de biomassa estudada. A casca de pistache, por exemplo, teve um rendimento de bio-óleo de 10% e 30% maior em relação as pétalas de açafreão e cascas de laranjas, respectivamente. Além disso, a casca de laranja teve um rendimento expressivo de 45% em massa de biogás, na temperatura de 500°C. Algumas justificativas são dadas: no caso das cascas de pistache, o maior rendimento de bio-óleo ocorreu devido a presença de um maior teor de material volátil; já para as pétalas de açafreão e casca de laranja, o maior rendimento em biogás ocorreu pela maior carga mineral em comparação ao resíduo de pistache, uma vez que os minerais podem catalisar reações e promover interações entre diferentes produtos gerando uma quantidade maior de gás.

3.3 Efeito da taxa de aquecimento

A taxa de aquecimento foi o segundo parâmetro mais avaliado em relação ao seu efeito sobre o rendimento dos produtos da pirólise. Chen *et al.* (2016) estudaram a pirólise de madeira de *Populus alba* e encontrou uma redução no rendimento em *biochar* com o aumento da taxa de aquecimento de 10 para 50°C min⁻¹; contudo, essa queda foi mais significativa (até 2,88% em massa) em temperaturas mais baixas (em torno de 400°C) do que em temperaturas mais altas (de apenas 0,64% em massa em torno de 600°C). Por outro lado, os autores observaram que o rendimento de bio-óleo cresceu com o aumento da taxa de aquecimento passando de 37,62% na taxa de 10°C min⁻¹ para 41,83% em 50°C min⁻¹ a 400°C. Neste caso, um incremento de temperatura para 600°C resultou na diminuição da formação de bio-óleo, independente da taxa de aquecimento (10, 30 ou 50°C min⁻¹). Por fim, a formação do biogás foi pouco afetada com a variação da taxa de aquecimento, ou seja, o

rendimento do produto gasoso está mais relacionado com o efeito da temperatura: em temperatura mais baixas, taxas menores geravam mais gases não-condensáveis.

Algumas características dos produtos foram apontadas por Chen *et al.* (2016). Variações nas taxas de aquecimento não trazem muitos efeitos em relação a composição do bio-óleo, exceto o aumento de compostos fenólicos e a redução de compostos ácidos. No caso do *biochar*, o estudo indicou que os resultados de análise imediata vão ao encontro das variações obtidas com o aumento da temperatura: um aumento do carbono fixo e da quantidade de cinzas e uma diminuição do conteúdo volátil. No entanto, os autores destacam que essas variações são poucos significativas quando comparadas as variações com o acréscimo da temperatura. Por fim, o trabalho demonstra a influência da razão de aquecimento na composição do biogás, onde um aumento deste parâmetro eleva o conteúdo de CO e CH₄, diminuindo o conteúdo de CO₂ e H₂.

Shah *et al.* (2021) observaram na pirólise de diferentes tipos de casca de noz que em taxas menores de até 20 °C min⁻¹ se tem um acréscimo mais significativo tanto do rendimento do bio-óleo quanto do biogás. Assim como observado em outros estudos, o *biochar* tende a diminuir com o aumento da taxa de aquecimento. Contudo quando a taxa passou a ser 50°C min⁻¹, as quantidades de todos os produtos tenderam a se manter constantes, algo que difere do estudo de Chen *et al.* (2016). Os autores destacam que essa variação nos produtos em altas taxas de aquecimento é devido a uma rápida despolimerização dos primeiros voláteis, a prevenção de reações secundárias e a redução da resistência entre transferência de massa e energia durante a pirólise.

Bhattacharjee e Biswas (2019) reafirmam que taxas mais altas de aquecimento (de 25 até 75°C min⁻¹) acabam minimizando a resistência à transferência de massa e energia. Contudo, quando a taxa se torna muito alta (100°C min⁻¹), o bio-óleo começa a se degradar e gerar maior quantidade de biogás. Mishra, Kumar e Mohanty (2020) apresentam que com taxas menores, os voláteis presentes na biomassa, não possuem energia suficiente para conseguir escapar da estrutura da biomassa e, dessa forma, existe uma quantidade maior de *biochar*, do que os outros produtos. Em contrapartida, isso não garante uma boa aplicabilidade para o produto sólido, devido ao fato de poder ter uma carga de materiais voláteis muito grande. Bhattacharjee e Biswas (2019) ainda demonstram que o *biochar* gerado a partir de bagaço de laranja em reator semi-batelada, tem uma queda em seu rendimento de

33,02% para 24,87% quando a taxa de aquecimento passa de $25^{\circ}\text{C min}^{-1}$ para $100^{\circ}\text{C min}^{-1}$. A quantidade de biogás, por sua vez, teve um crescimento de 3,52% nas mesmas condições. Outro fator descrito, foi a quantidade de água presente no bio-óleo: notou-se uma queda na porcentagem (4,96 para 3,51%) com o aumento da taxa de aquecimento. Os autores identificaram que quando se tem o aumento da taxa de aquecimento, a quantidade de CO presente no biogás também aumenta, devido a uma intensificação das reações de descarbonização causando, conseqüentemente, a redução de CO_2 .

Saikia *et al.* (2015) realizaram a pirólise de cana-vieira (*Arundo donax*) e observaram que o incremento da temperatura (de 350°C para 500°C) gerava uma queda de 3% no rendimento do *biochar* em taxas de aquecimento de $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$. Já quando a taxa passava a ser $40^{\circ}\text{C min}^{-1}$, a queda aumenta para 7%. O teor em *biochar* tende a ser maior para uma taxa de aquecimento menor, devido a desaceleração da despolimerização primária da biomassa, responsável pela formação dos produtos líquidos e gasosos. Neste estudo, o rendimento do bio-óleo e do biogás é crescente com o aumento da taxa de aquecimento.

Como reafirmação dos estudos anteriores, Chandrasekaran, Ramachandran e Subbiah (2018) demonstraram que com o aumento da taxa de aquecimento, o rendimento do *biochar* diminui, porém garante-se uma completa carbonização da biomassa. Além disso, os autores observaram que para uma subida gradual das taxas de aquecimento, desde 5, 10 e $20^{\circ}\text{C min}^{-1}$, geram-se 24,6%, 27,9% e 35,2% em massa de bio-óleo à 400°C , respectivamente. Contudo, neste estudo foi possível observar uma tendência um pouco diferente dos demais em relação ao biogás com o aumento da taxa de aquecimento. É notável que o aumento da taxa garante uma maior quantidade do produto gasoso, porém, se a temperatura for avaliada conjuntamente, um comportamento diferente é observado: em temperatura mais baixas ($400\text{-}500^{\circ}\text{C}$), o rendimento tende a aumentar, porém quando a temperatura passa a ser 600°C , o biogás tende a diminuir.

Borel *et al.* (2020) apresentam que a taxa de aquecimento tem um efeito muito mais expressivo do que a temperatura no rendimento do bio-óleo. Com o aumento da taxa de aquecimento de 10 para $30^{\circ}\text{C min}^{-1}$ o rendimento do bio-óleo também aumenta nas três temperaturas em estudo (450°C , 550°C e 650°C). Já quando a taxa passa a ser $50^{\circ}\text{C min}^{-1}$, a quantidade do produto líquido tem um acréscimo $<1\%$ em 450°C , porém acima dessa temperatura o rendimento tende a cair. Os autores

explicam que devido a diminuição da resistência de transferência de calor e massa em taxas maiores, a temperatura desempenhará a influência principal no rendimento do bio-óleo. Abbas *et al.* (2018) reafirmam este comportamento: em taxas menores de aquecimento (1, 2, 5 e 10°C min⁻¹) a formação de bio-óleo é favorecida, porém em taxas maiores se observou que uma queda de 1 a 2% em seu rendimento.

3.4 Efeito do tamanho de partícula

Durante o estudo de Shah *et al.* (2021), os autores perceberam que o aumento do tamanho de partícula (0,5-1,25 para 2,5mm) aumentava o rendimento do bio-óleo (1-6%) e *biochar* (1-4%) e diminuía o rendimento em biogás (7-11%). Contudo, quando o tamanho de partícula passava para 3,0 mm, a quantidade de bio-óleo era reduzida. Os autores justificaram essas variações devido ao gradiente de temperatura no interior da biomassa, pois a temperatura no interior da partícula de biomassa era menor do que na superfície gerando poucas reações de transformação primária, ocasionando uma maior quantidade de *biochar*, e, conseqüentemente, um menor rendimento dos demais produtos.

Liu *et al.* (2018) demonstraram que com a diminuição do tamanho de partícula se tinha um aumento no rendimento de bio-óleo e um decaimento no rendimento do *biochar* gerados a partir da casca de amendoim. Já o biogás apresentou um comportamento diferente do que Shah *et al.* (2021) observaram: primeiramente, seu rendimento aumentou com a redução do tamanho de partícula (0,150-0,300 mm), ocorrendo uma queda para tamanhos ainda menores (0,075 mm). A explicação dada por Liu *et al.* (2018) foi em relação ao fato de existir uma limitação da decomposição secundária do *biochar*. Além disso, os autores identificaram que com partículas maiores criou-se um gradiente maior de temperatura dentro da biomassa, o que favoreceu a maior quantidade de *biochar* em detrimento aos demais produtos. Ademais, os vapores que são produzidos durante a quebra do *biochar* acabam ficando retidos no interior do sólido, ocasionando reações secundárias, e produzindo, assim, maior quantidade de *biochar*.

Algumas características físico-químicas do *biochar* também foram analisadas por Liu *et al.* (2018). Foi possível identificar que o aumento do tamanho de partícula reduziu os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, carbono fixo e cinzas presentes na composição do *biochar*. Os autores indicaram que menores partículas garantem uma pirólise completa da biomassa, possuindo esta também um pH mais alcalino, pois

em sua composição a quantidade de ácidos é reduzida. Além disso, os autores identificaram que a área superficial e os tamanhos dos poros são favorecidos com a diminuição do tamanho de partícula, passando de 15,88 m²/g com tamanho de 0,3-2,0 mm para 20,96 m²/g com tamanho <0,075 mm. O tamanho de partícula é um dos parâmetros (fora a temperatura) que mais afeta esta característica do *biochar*.

Algumas reafirmações sobre o efeito do tamanho de partícula foram feitas por Chandrasekaran, Ramachandran e Subbiah (2018). Em seu estudo, foi observado um aumento no rendimento de *biochar* e de bio-óleo e uma queda de biogás quando se teve o aumento do tamanho de partícula. Eles demonstram que com partículas menores existe uma maior área de contato favorecendo o processo de transferência de massa e energia da fase sólida com a gasosa. Assim, como observado pelos autores supracitados, tamanhos maiores garantem que a matéria volátil permaneça mais tempo no interior da biomassa favorecendo reações de craqueamento térmico secundário para produzir mais gases. O teor de carbono fixo no *biochar* aumenta devido as reações repolimerização. Além disso, maiores partículas e maiores taxas de aquecimento geraram a maior quantidade de bio-óleo encontrada no estudo, de 38,3% com tamanho de partícula de 1-2 mm na temperatura de 500°C com taxa de aquecimento de 20°C min⁻¹.

Chandrasekaran, Ramachandran e Subbiah (2018) também observaram que o aumento do tamanho de partícula aumentava significativamente o conteúdo de CO₂ no biogás, enquanto a quantidade de CO apresentava uma leve queda, assim como, a quantidades de H₂ e CH₄ em taxas baixas de aquecimento. O *biochar* apresentou uma queda de 3,51% no teor de C quando o tamanho de partícula aumentou de 0,2-0,5 mm para 1- 2 mm. O bio-óleo tem seu conteúdo de cinzas e voláteis alterado com o tamanho de partícula. Além disso, a quantidade de furanos aumentaram de 20,41% para 21,73% e compostos de ácido acético reduziram de 20,58% para 18,26% com o aumento do tamanho de partícula. O estudo afirma que o tamanho de partícula e a taxa de aquecimento são os principais parâmetros que afetam a composição do bio-óleo.

Wang *et al.* (2022) realizaram uma pirólise com madeira de *Pinus* para partículas grandes (de 1 cm, 1,5 cm e 2 cm) e de sua serragem. Em baixas temperaturas (600°C), os autores identificaram uma queda (10,43%) na quantidade de ácidos carboxílicos presentes no bio-óleo em comparação com a serragem com tamanhos de 1 cm. Porém, eles observaram que em temperaturas mais altas (800°C)

a composição do bio-óleo se tornava muito mais sensível a mudanças no tamanho de partícula, uma vez que as reações secundárias intrapartículas se intensificam com o aumento das partículas nestas condições. Para tamanhos maiores, na temperatura de 900°C, os autores observaram que existe um aumento do processo de desoxigenação e aromatização no bio-óleo.

El Farissi, Talhaoui e El Bachiri (2022) identificaram, na pirólise de semente de *Pistacia lentiscus L.*, que o aumento do tamanho de partícula gera uma maior quantidade de bio-óleo, passando de 49% (para partículas de 0,075-0,15mm) para 54,07% (para partículas de 0,15-0,3mm). Os autores encontraram o maior rendimento em bio-óleo de 63,86% com partículas de 0,3-0,6 mm a 475°C e 25°C min⁻¹. No caso do *biochar*, ao contrário dos outros estudos, observou-se uma queda no rendimento nos tamanhos de 0,075-0,15 mm até 0,3-0,6 mm; após este tamanho, tendeu a aumentar. Além disso, o biogás apresentou um comportamento igual ao observado anteriormente, ou seja, um decaimento com o aumento do tamanho de partícula. É importante observar que neste estudo foram utilizadas condições diferentes dos demais processos citados anteriormente. O objetivo da pesquisa foi minimizar os custos da pirólise, não utilizando um gás de arraste durante o processo. Sendo assim essas possíveis variações de rendimento podem ser explicadas devida a esse fator. Na seção 3.6 será discutido o efeito do gás de arraste no rendimento dos produtos.

Alguns estudos reafirmam como o rendimento do bio-óleo é afetado com o aumento do tamanho de partícula, dentre eles, tem-se: Abbas *et al.*, (2018), demonstraram que o volume de bio-óleo decaiu de 24,67% para 18,72% quando o tamanho de partícula passou de <200 mesh (0,074mm) para 50-10 mesh (0,297-2,0mm); Gupta, Gupta e Mondal (2019) apresentaram a mesma tendência, porém o rendimento cresceu de forma menos intensa passando de 47% para 48,8% na variação de 25 a 80 mesh (0,707mm a 0,177mm). Por outro lado, Mohseni-roodbari *et al.*, (2022) observaram que quando o tamanho de partícula diminuía desde 10 mesh (1,68mm) até 60mesh (0,25mm) o rendimento do bio-óleo também caía; todavia, quando o tamanho de partícula foi ainda mais reduzido, o seu rendimento tendeu a aumentar. Mohseni-roodbari *et al.*, (2022) entenderam que partículas menores são mais interessantes para o processo da pirólise, pois garantem a ausência de um gradiente e da resistência à transferência de massa e energia. Além disso, indicaram que o tamanho de partícula não gera uma variação tão significativa no rendimento quando se comparado ao aumento de temperatura.

Sirijanusorn, Sriprateep e Pattiya (2013) realizaram a pirólise de rizoma de mandioca em reator contínuo. Os autores observaram que tamanho de partículas menores que 0,250mm geravam uma quantidade pequena de bio-óleo, em torno de 26,8%. Já quando o tamanho estava entre 0,250-0,425mm se teve a maior quantidade do produto líquido (43,05%), contudo se obteve o menor rendimento de *biochar*. Com tamanhos maiores que 0,425mm se teve uma queda do bio-óleo para 37,84%. Apesar de ser realizado em reator contínuo os resultados obtidos estão muito próximos dos estudos anteriores citados que realizaram a pirólise em reatores de leito fixo. Além disso, a justificativa dos autores para esta variação no rendimento dos produtos é semelhante as anteriores, nas quais demonstram que partículas maiores têm pouca área superficial e seu interior não consegue obter calor suficiente para serem degradados, ocasionado um maior rendimento do produto sólido.

3.5 Efeito do tempo de residência

O estudo de Liu *et al.* (2018) mostrou que o aumento do tempo de residência faz com que o *biochar* da casca de amendoim se decomponha mais rapidamente devido ao aumento das reações de craqueamento, fazendo com que seu rendimento caia. O bio-óleo passou de 20,54% para 24,1% quando o tempo de retenção passou de 15 para 90 min. O biogás teve um comportamento semelhante ao bio-óleo no mesmo período de tempo, passando de 30,07% para 38,41%. Abbas *et al.* (2018), para a casca de arroz, obtiveram resultados semelhantes. Abbas *et al.* (2018) acrescentaram que a fase aquosa diminui com um tempo maior de retenção. Em relação as propriedades do *biochar*, os autores identificaram que o aumento do tempo de residência eleva o teor de carbono presente no sólido (passando de 54,15% para 70,89%), assim como, o teor de carbono fixo e de cinzas. Ademais, as propriedades físico-químicas tiveram uma variação muito parecida ao observado com o aumento da temperatura (aumento de área superficial, aumento no tamanho de poros, aumento do poder calorífico, entre outros), porém de forma menos significativa.

Açikalin e Karaca (2017) fizeram observações parecidas às dos estudos acima para a pirólise da casca de castanha. Contudo, os autores observaram que não se teve uma alteração na quantidade de *biochar* formado com o aumento do tempo de residência (de 10 min para 50 min), ficando em torno de 27%. Já com o bio-óleo, se observou o aumento de 0,25% do rendimento com um tempo até 20 min. Quando o tempo de residência atingiu 50 min, o rendimento do produto líquido apresentou uma

queda de 2,72%, comportamento que não foi observado nos estudos acima. O biogás, por sua vez, tendeu a aumentar em qualquer tempo sendo mais significativo no período de decaimento do bio-óleo, principalmente por este estar sendo quebrado em gases não-condensáveis. Os autores citam que uma quantidade maior de celulose pode afetar a taxa da pirólise e diminuir o tempo de residência (algo observado em estudos comparativos).

Omvesh *et al.* (2023) identificaram que um tempo mais longo faz com que a biomassa receba mais calor e as reações de craqueamento secundários sejam favorecidas, ou seja, a quantidade de *biochar* tende a diminuir, enquanto as quantidades de bio-óleo e de biogás tendem a aumentar. Subagyono *et al.* (2022) observaram as mesmas tendências para o rendimento dos produtos da pirólise de madeira *Macaranga gigantea*. Subagyono *et al.* (2022) identificaram que a composição do bio-óleo possuía uma proporção maior de compostos aromáticos, com o aumento do tempo de 15 min para 30 min. Além disso, notaram que compostos de cadeias alifáticas longas e fenóis eram reduzidos. Por fim, os autores observaram um aumento na quantidade de ácido acético presente no produto líquido, o que ocasionou uma diminuição de seu pH.

Muitos estudos que avaliaram o tempo de residência utilizaram reatores contínuos, algo pouco observado nos estudos dos demais parâmetros. Ningbo *et al.* (2015) realizaram a pirólise de serragem de pinus e apontaram que o rendimento do *biochar* decai com o aumento do tempo de residência do sólido dentro do reator. Em desacordo ao observado nos demais estudos, o reator contínuo diminui a formação de gás em tempos de residência de 3-4 min e depois aumenta a formação para um tempo de 7 min. O rendimento em bio-óleo, por sua vez, aumentou até um valor máximo de 51,7% em 6 min de reação, apresentando uma queda para 46,97% em 7 min. Os valores tendem a ter uma variação diferente de quando comparada a leitos fixos, pois em um reator contínuo o tempo de residência está correlacionado ao período que o produto sólido permanece no reator.

Outro estudo que demonstrou o efeito do tempo de residência em um reator contínuo foi o de Solar *et al.* (2016) os quais demonstraram que com o aumento do tempo se tem um aumento no rendimento de biogás e uma redução da quantidade de *biochar* e bio-óleo. Os autores destacaram que o *biochar* não apresenta grandes variações com o aumento do tempo de 32 min para 64 min em baixas taxas de aquecimento, apresentando uma variação de apenas 1,8%. Ademais, o bio-óleo, em

altas taxas e temperaturas, teve uma queda no seu rendimento de quase 4% para o aumento do tempo. Quando os autores compararam os resultados encontrados no seu trabalho com informações da literatura concluíram que o efeito do tempo de residência não é um parâmetro independente, pois a temperatura final e a taxa de aquecimento apresentam um efeito dominante.

3.6 Efeito de outros parâmetros

Nesta seção, serão discutidos como outros parâmetros de operação podem afetar o rendimento dos produtos no processo, dentre eles, a variação do fluxo de gás inerte no processo e tipos de reatores não convencionais.

Ferreira *et al.*, (2020) estudou como o efeito do gás inerte (N_2) alterava o rendimento dos produtos da pirólise do cacho de fruto vazio de palma. Os autores identificaram que com o aumento do fluxo de gás, de $0,259 \text{ L min}^{-1}$ para $0,541 \text{ L min}^{-1}$, o *biochar* apresentava uma redução de 3,57%, o bio-óleo era favorecido tendo um aumento de 0,49% e o biogás aumentava em 1,27%. Shah *et al.* (2021) estudou menores fluxos para o gás de arraste, porém conseguiu reafirmar o que Ferreira *et al.*, (2020) descreveu, observando que o rendimento de *biochar* tinha uma queda de 24,8% para 22% quando o fluxo aumentava de $0,048 \text{ L min}^{-1}$ para $0,15 \text{ L min}^{-1}$. O biogás teve um aumento de 33,7% para 38,2% na mesma variação do fluxo de gás. Contudo, Shah *et al.* (2021) entendeu que esse efeito do gás de arraste está ligado ao fato de que quanto maior for o fluxo de gás maior será a retirada de componentes voláteis do reator sem terem sido devidamente condensados, além de reduzir reações secundárias de craqueamento e de repolimerização.

Bhattacharjee e Biswas (2018) identificaram que o fluxo de gás de arraste vai ter um impacto no tempo de residência do tempo fase gasosa e vai restringir algumas reações de craqueamento secundário. Os autores, quando realizaram a pirólise de *Alternanthera philoxeroides*, identificaram tendências semelhantes para o rendimento de *biochar* e biogás, quando comparados ao estudo de Ferreira *et al.*, (2020). Contudo, o rendimento do bio-óleo apresentou uma variação: para um aumento do fluxo de gás de arraste de 0,1 para $0,2 \text{ L min}^{-1}$ houve um crescimento no rendimento até atingir o seu máximo rendimento (42,28%); acima de $0,2 \text{ L min}^{-1}$ observou-se uma queda de 8,32% até $0,5 \text{ L min}^{-1}$. Wulandari *et al.* (2020) observou o mesmo comportamento para o rendimento do bio-óleo quando realizou a pirólise de resíduo marrom proveniente da fermentação de etanol celulósico de casca de arroz. Além

disso, notou que com o aumento do fluxo de nitrogênio, a quantidade de água presente no bio-óleo cai de 15% em $0,02 \text{ L min}^{-1}$ para 3% em $0,15 \text{ L min}^{-1}$.

Demiral e Kul (2014) determinaram como o rendimento dos produtos da pirólise, proveniente da casca do caroço de damasco, são afetados com a ausência do gás de arraste e o aumento de seu fluxo. Quando não foi utilizado o gás, a quantidade de bio-óleo era de 25%; porém, quando o gás foi introduzido a uma vazão de $0,15 \text{ L min}^{-1}$, se teve um acréscimo da quantidade passando para 26,3%. Os autores observaram que a quantidade de produto líquido tende a ser maior se o fluxo de gás de arraste não for excessivo, pois notaram que um aumento do fluxo para $0,2 \text{ L min}^{-1}$ a quantidade de bio-óleo caiu. Isto foi explicado, pois altas vazões fazem com que o gás condensável não consiga se resfriar a tempo de sair do reator, prejudicando assim o rendimento do produto líquido. Os autores reafirmaram o que Shah *et al.* (2021) observaram para as reações secundárias: estas são desfavorecidas quando se aumenta o fluxo de gás pois arrastam os gases da região quente para a região fria do reator impedindo que reações de craqueamento, oxidação parcial e repolimerização ocorram.

Chandrasekaran, Ramachandran e Subbiah (2018) realizaram o estudo de como a porcentagem de umidade na biomassa afeta o rendimento dos produtos. Quando a umidade mudava de 0% para 10%, o rendimento do produto líquido e gasoso se mantinha constante, contudo, o rendimento do produto sólido tendia a diminuir. Os autores demonstraram que uma reação endotérmica entre CO_2 e água reduz a temperatura e acaba diminuindo o rendimento do produto sólido.

Paenpong e Pattiya (2016) realizaram a pirólise do rizoma da mandioca em um reator de leito móvel que possuía um processo de separação dos produtos após a pirólise, o qual consistia em filtros de areia que operavam em temperaturas diferentes. Durante o seu estudo, os filtros para o processo de separação possuíam uma variação de temperatura. Quando o meio filtrante aumentava a temperatura de 350°C para 380°C , o rendimento do produto líquido aumentava em 3,5% em massa e do gasoso em 0,4%, enquanto o *biochar* tinha uma queda de 2,2%. O estudo apontou que o *biochar* acaba se decompondo em bio-óleo quando a temperatura ultrapassa 380°C . Os autores estudaram mais um acréscimo na temperatura do meio filtrante, 410°C , porém não observaram variações nos rendimentos dos produtos nesta temperatura. Algumas observações foram feitas referentes as características dos produtos gerados: o bio-óleo teve um aumento no seu teor de água de 24,4% em

350°C para 29,5% em 410°C e o teor de cinzas foi reduzido em 78-99% para a mesma faixa de temperatura; o biogás foi pouco afetado com o sistema de filtragem, a não ser a quantidade de CH₄ presente que foi aumentada.

Hasan *et al.* (2017) realizou a pirólise em um reator no qual a madeira de *Mallee* era moída enquanto o processo de transformação termoquímica acontecia. Os autores observaram um maior efeito deste parâmetro no rendimento do bio-óleo. A comparação realizada entre os procedimentos foi com e sem o uso da moagem. Durante o aumento da rotação com o processo de moagem, a quantidade da fase orgânica do bio-óleo aumentou em 7%. Segundo os autores, isso ocorreu devido à maior facilidade de transferência de calor. Essas observações contidas nesse estudo são muito semelhantes com o efeito do tamanho de partícula apresentado na seção 3.4.

Outro estudo que identificou como as características dos reatores afetam a formação dos produtos foi o de Nawaz *et al.* (2023). Os autores observaram que quando se mudava a altura do leito do reator de 6 cm para 12 cm, na pirólise de casca de castanha d'água, havia uma variação do rendimento dos produtos. Segundo eles, quando se tinha o incremento desta altura, a quantidade formada de bio-óleo e de biogás tendiam a diminuir, pelo fato de ocorrer a recondensação dos voláteis no *biochar*. Contudo, o produto sólido tendia a aumentar com o aumento da altura pois favorecia a resistência de transferência de massa e energia fazendo com que se tivesse um maior rendimento e um *biochar* mais rico em carbono.

Gholizadeh, Hu e Liu (2019) realizaram uma revisão sistemática para observar como as características de 20 biomassas diferentes poderiam afetar no rendimento do bio-óleo. Os autores concluíram para a pirólise de biomassas provenientes de madeiras que, quanto maiores forem as quantidades de celulose e hemicelulose, maior será o rendimento dos produtos gasosos. Eles notaram que apesar de normalmente a lignina estar ligada com a formação do *biochar*, nos estudos encontrados de biomassas de madeiras não existe essa correlação de forma evidente. Ademais, foi possível observar que a composição elementar das biomassas afetava a do bio-óleo. Contudo, quando se tratava de biomassas herbáceas, o comportamento era diferente das biomassas de madeira. Os autores entenderam que esse fator poderia ser devido à alta carga de cinzas presente nestas biomassas o que acarreta uma catalisação do processo. Neste caso, o efeito dos componentes lignocelulósicos não se torna tão expressivo.

4 CONCLUSÃO

Dentro do escopo deste trabalho, a temperatura foi o parâmetro de operação mais avaliado em todos os artigos, os quais realizaram a pirólise entre 300°C até 900°C. Com o seu incremento, foi possível observar que todos os autores identificaram uma queda no rendimento do *biochar*. Contudo, o poder calorífico deste produto, assim como seu conteúdo de carbono fixo, era aumentado quando se tinha o aumento da temperatura, resultando em características importantes para aplicabilidade do produto sólido. Além disso, observou-se que com o incremento da temperatura, a área superficial do *biochar* aumentava, porém em temperaturas muito elevadas, se tinha um decaimento, devido ao processo de fusão dos poros. A partir dessas variações nas características do produto sólido, foram identificadas algumas aplicações em potencial – além do seu uso como combustível – como: sequestro de carbono da atmosfera e regulação do pH do solo. O bio-óleo, por sua vez, apresentou um comportamento diferente quando a temperatura se elevava: o seu rendimento máximo era obtido por volta dos 500°C, contudo, acima disso, o produto líquido era degradado e seu rendimento caía. Em contrapartida, o biogás teve seu rendimento aumentado ao longo de toda a faixa de temperatura, apresentando uma maior formação de CH₄ e H₂ para temperaturas maiores.

A taxa de aquecimento foi o segundo parâmetro mais avaliado pelos artigos. Quando o seu valor aumentava se tinha uma redução no rendimento do *biochar*, um aumento do bio-óleo e do biogás. Contudo, estas variações não foram um consenso entre todos os artigos: em alguns estudos, o rendimento do biogás, quando avaliado em conjunto com a temperatura, resultou em um pico de rendimento em temperaturas intermediárias. Com o aumento da taxa de aquecimento ocorre uma rápida despolimerização, uma prevenção de reações secundárias e uma redução da resistência entre transferência de massa e energia. O *biochar* tem suas características mudadas enquanto a taxa de aquecimento se altera sendo parecido com as alterações relacionadas ao aumento da temperatura, porém de forma menos intensa. O conteúdo aquoso do bio-óleo se altera, tendo uma redução quando realizada uma pirólise em taxas maiores.

A alteração do tamanho de partícula gera algumas variações nos rendimentos dos produtos: o *biochar* tendem a aumentar, o bio-óleo em partículas menores aumenta até um momento no qual o desprendimento de voláteis da matriz da

biomassa será dificultado reduzindo o seu rendimento e o biogás tende a diminuir quando o tamanho das partículas é maior. Os autores entram em consenso que, quando se têm partículas maiores, é formado um gradiente de temperatura no interior da biomassa, favorecendo a formação de *biochar*, pois grande parte do material volátil fica retido; conseqüentemente, o produto gasoso acaba sendo menor. O aumento do tamanho de partícula acaba desfavorecendo as características do *biochar*, pois uma maior quantidade de material volátil acaba ocasionando uma incompleta carbonização do sólido.

Em relação ao tempo de exposição da biomassa no interior do reator, verificou-se que seu aumento diminui o rendimento do *biochar* e aumenta o rendimento em bio-óleo e biogás. A explicação dos autores envolve o favorecimento das reações de craqueamento secundárias, devido ao *biochar* ficar mais tempo exposto a uma temperatura elevada. A maioria dos artigos que avaliaram este parâmetro realizaram a pirólise em reatores contínuos, no entanto, as observações encontradas são semelhantes às dos reatores de leito fixo. Isto ocorre pois nos reatores contínuos o tempo de residência está ligado ao tempo em que o produto sólido permanece no interior do reator, e, dessa forma, quanto maior for o tempo de residência, menor será o rendimento em *biochar* e, conseqüentemente, maior será o rendimento dos demais produtos.

Foi identificado ao decorrer da revisão que outros parâmetros também são importantes no processo de pirólise, como o fluxo de gás de arraste, a umidade e o tipo de biomassa. No caso do aumento do fluxo de gás, grande parte dos gases são arrastados para fora do reator, ocasionando uma maior formação de bio-óleo, pois estes gases condensáveis não permanecem tempo suficiente no reator para que se quebrem e formem os gases componentes do biogás. Além disso, foi observado que a quantidade de umidade nas amostras afeta negativamente o rendimento do *biochar*. Por fim, o tipo da biomassa pode ter um impacto importante na formação dos produtos, principalmente pela sua composição elementar e lignocelulósica.

A partir dessa revisão sistemática da literatura foi possível observar que os principais critérios de exclusão dos artigos avaliados (pirólise catalisada, pirólise por micro-ondas, uso de pré-tratamentos e co-pirólise) indicam uma tendência de pesquisa a partir de 2010 nesta área. Entende-se que, o processo tradicional de pirólise pode gerar resultados que podem ser otimizados, tanto relação a quantidade quanto a qualidade dos produtos gerados. Sendo assim, foi possível identificar que é

necessário buscar novas formas de realizá-lo para tentar melhorar o rendimento dos produtos e tentar, de certa forma, minimizar os custos do processo.

5 REFERÊNCIAS

ABBAS, Q. *et al.* Contrasting effects of operating conditions and biomass particle size on bulk characteristics and surface chemistry of rice husk derived-biochars. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 134, p. 281–292, 1 set. 2018.

AÇIKALIN, K.; KARACA, F. Fixed-bed pyrolysis of walnut shell: Parameter effects on yields and characterization of products. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 125, p. 234–242, 1 maio 2017.

ANCA-COUCÉ, Andrés. Reaction mechanisms and multi-scale modelling of lignocellulosic biomass pyrolysis. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 53, p. 41-79, 2016.

BALAT, M. An overview of the properties and applications of biomass pyrolysis oils. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v. 33, n. 7, p. 674–689, jan. 2011.

BHATTACHARJEE, N.; BISWAS, A. B. Pyrolysis of *Alternanthera philoxeroides* (alligator weed): Effect of pyrolysis parameter on product yield and characterization of liquid product and bio char. **Journal of the Energy Institute**, v. 91, n. 4, p. 605–618, 1 ago. 2018.

BHATTACHARJEE, N.; BISWAS, A. B. Pyrolysis of orange bagasse: Comparative study and parametric influence on the product yield and their characterization. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 1, 1 fev. 2019.

BOREL, L. D. M. S. *et al.* An investigation on the pyrolysis of the main residue of the brewing industry. **Biomass and Bioenergy**, v. 140, 1 set. 2020.

BRASIL. **Protocolo de Quioto**. Brasília: [s.n.].

BRASIL. **Acordo de Paris**., 2015.

BRIDGWATER, A. V; MEIER, D.; RADLEIN, D. An overview of fast pyrolysis of biomass. 1999.

CHANDRASEKARAN, A.; RAMACHANDRAN, S.; SUBBIAH, S. Modeling, experimental validation and optimization of *Prosopis juliflora* fuelwood pyrolysis in fixed-bed tubular reactor. **Bioresource Technology**, v. 264, p. 66–77, 1 set. 2018.

CHEN, D. *et al.* Pyrolysis polygeneration of poplar wood: Effect of heating rate and pyrolysis temperature. **Bioresource Technology**, v. 218, p. 780–788, 1 out. 2016.

CUOCI, Alberto *et al.* A general mathematical model of biomass devolatilization Note 1. Lumped kinetic models of cellulose, hemicellulose and lignin. In: **Proceedings of the 30th Meeting of the Italian section of the Combustion Institute**. 2007.

CZERNIK, S.; BRIDGWATER, A. V. Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. **Energy and Fuels**, v. 18, n. 2, p. 590–598, mar. 2004.

DATA. **Data & Statistics - IEA**. IEA. Disponível em: < <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource> >. Acesso em: 2 out. 2023.

DEMIRAL, I.; AYAN, E. A. Pyrolysis of grape bagasse: Effect of pyrolysis conditions on the product yields and characterization of the liquid product. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 4, p. 3946–3951, fev. 2011.

DEMIRAL, I.; KUL, Ş. Ç. Pyrolysis of apricot kernel shell in a fixed-bed reactor: Characterization of bio-oil and char. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 107, p. 17–24, 2014.

DEMIRBAS, A. Determination of calorific values of bio-chars and pyro-oils from pyrolysis of beech trunkbarks. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 72, n. 2, p. 215–219, 2004.

DIEBOLD, James P. A unified, global model for the pyrolysis of cellulose. **Biomass and Bioenergy**, v. 7, n. 1-6, p. 75-85, 1994.

DOMENICO, M. D. *et al.* Gasification of Brazilian coal-chars with CO₂: effect of samples' properties on reactivity and kinetic modeling. **Chemical Engineering Communications**, v. 206, n. 2, p. 158–168, 1 fev. 2019.

EL FARISSI, H.; TALHAOUI, A.; EL BACHIRI, A. Influence of pyrolysis process on the production of bio-oil used as alternative green energy from Pistacia lentiscus L. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 168, 1 nov. 2022.

FARAVELLI, Tiziano *et al.* Detailed kinetic modeling of the thermal degradation of lignins. **Biomass and bioenergy**, v. 34, n. 3, p. 290-301, 2010.

FERREIRA, M. F. P. *et al.* Generation of biofuels by slow pyrolysis of palm empty fruit bunches: Optimization of process variables and characterization of physical-chemical products. **Biomass and Bioenergy**, v. 140, 1 set. 2020.

GARCIA-NUNEZ, J. A. *et al.* Historical Developments of Pyrolysis Reactors: A Review. **Energy and Fuels**, v. 31, n. 6, p. 5751–5775, 15 jun. 2017.

GHOLIZADEH, M.; HU, X.; LIU, Q. **A mini review of the specialties of the bio-oils produced from pyrolysis of 20 different biomasses**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Elsevier Ltd, 1 out. 2019.

GUPTA, G. K.; GUPTA, P. K.; MONDAL, M. K. Experimental process parameters optimization and in-depth product characterizations for teak sawdust pyrolysis. **Waste Management**, v. 87, p. 499–511, 15 mar. 2019a.

HASAN, M. M. *et al.* Grinding pyrolysis of Mallee wood: Effects of pyrolysis conditions on the yields of bio-oil and biochar. **Fuel Processing Technology**, v. 167, p. 215–220, 2017.

HOSSEINZAEI, B. *et al.* Pyrolysis of pistachio shell, orange peel and saffron petals for bioenergy production. **Bioresource Technology Reports**, v. 19, 1 set. 2022.

KAN, T.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 1126–1140, 1 maio 2016.

KITCHENHAM, B. **Procedures for performing systematic reviews**. Keele, UK, Keele Uni-versity, v. 33, n. 2004, p. 1-26, 2004.

LIN, X. *et al.* Review on development of ionic liquids in lignocellulosic biomass refining. **Journal of Molecular Liquids**, v. 359, 1 ago. 2022.

LIN, Yu-Chuan *et al.* Kinetics and mechanism of cellulose pyrolysis. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 113, n. 46, p. 20097-20107, 2009.

LIU, R. *et al.* Operating conditions-induced changes in product yield and characteristics during thermal-conversion of peanut shell to biochar in relation to economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 193, p. 479–490, 20 ago. 2018.

MISHRA, R. K.; KUMAR, V.; MOHANTY, K. Pyrolysis kinetics behaviour and thermal pyrolysis of Samanea saman seeds towards the production of renewable fuel. **Journal of the Energy Institute**, v. 93, n. 3, p. 1148–1162, 1 jun. 2020.

MOHSENI-ROODBARI, S. *et al.* Thermal pyrolysis of linseed waste to produce a renewable biofuel using response surface methodology in a fixed bed reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 168, 1 nov. 2022.

MONG, G. R. *et al.* Progress and challenges in sustainable pyrolysis technology: Reactors, feedstocks and products. **Fuel**, v. 324, 15 set. 2022.

NAWAZ, A. *et al.* Pyrolysis of low-value waste Trapa natans peels: An exploration of thermal decomposition characteristics, kinetic behaviour, and pyrolytic liquid product. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 56, 1 mar. 2023..

NINGBO, G. *et al.* Continuous pyrolysis of pine sawdust at different pyrolysis temperatures and solid residence times. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 114, p. 155–162, 1 jul. 2015.

NGO, T. A.; KIM, J.; KIM, S. S. Characteristics of palm bark pyrolysis experiment oriented by central composite rotatable design. **Energy**, v. 66, p. 7–12, 1 mar. 2014.

OMVESH *et al.* Pyrolysis of pine needles: Parameter optimization using response surface methodology. **Bioresource Technology Reports**, v. 22, 1 jun. 2023.

PAENPONG, C.; PATTIYA, A. Effect of pyrolysis and moving-bed granular filter temperatures on the yield and properties of bio-oil from fast pyrolysis of biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 119, p. 40–51, 1 maio 2016.

PANG, Y. X. *et al.* The influence of lignocellulose on biomass pyrolysis product distribution and economics via steady state process simulation. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 158, 1 set. 2021.

SAIKIA, R. *et al.* Perennial grass (arundo donax L.) as a feedstock for thermo-chemical conversion to energy and materials. **Bioresource Technology**, v. 188, p. 265–272, 1 jul. 2015.

SHAH, M. A. *et al.* Pyrolysis of walnut shell residues in a fixed bed reactor: Effects of process parameters, chemical and functional properties of bio-oil. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, 1 ago. 2021.

SIRIJANUSORN, S.; SRIPRATEEP, K.; PATTIYA, A. Pyrolysis of cassava rhizome in a counter-rotating twin screw reactor unit. **Bioresource Technology**, v. 139, p. 343–348, 2013.

SOLAR, J. *et al.* Influence of temperature and residence time in the pyrolysis of woody biomass waste in a continuous screw reactor. **Biomass and Bioenergy**, v. 95, p. 416–423, 1 dez. 2016.

SONI, B.; KARMEE, S. K. Towards a continuous pilot scale pyrolysis based biorefinery for production of biooil and biochar from sawdust. **Fuel**, v. 271, 1 jul. 2020.

SUBAGYONO, R. D. J. N. *et al.* Pyrolysis of fast growing wood *Macaranga gigantea*: Product characterisation and kinetic study. **Fuel**, v. 315, 1 maio 2022.

TAN, Y. L.; ABDULLAH, A. Z.; HAMEED, B. H. Fast pyrolysis of durian (*Durio zibethinus* L) shell in a drop-type fixed bed reactor: Pyrolysis behavior and product analyses. **Bioresource Technology**, v. 243, p. 85–92, 2017.

TOSCANO MIRANDA, N. *et al.* Sugarcane bagasse pyrolysis: A review of operating conditions and products properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, 1 out. 2021.

VUPPALADADIYAM, Arun Krishna *et al.* A critical review on biomass pyrolysis: Reaction mechanisms, process modeling and potential challenges. **Journal of the Energy Institute**, p. 101236, 2023.

WANG, L. *et al.* Product distribution from pyrolysis of large biomass particle: Effects of intraparticle secondary reactions. **Fuel**, v. 325, 1 out. 2022.

WULANDARI, Y. R. *et al.* Effect of N₂ flow rate on kinetic investigation of lignin pyrolysis. **Environmental Research**, v. 190, 1 nov. 2020.

YU, J.; LIU, X.; MILLAN, M. A study on pyrolysis of wood of different sizes at various temperatures and pressures. **Fuel**, v. 342, 15 jun. 2023.

YU, S. *et al.* Characterization of biochar and byproducts from slow pyrolysis of hinoki cypress. **Bioresource Technology Reports**, v. 6, p. 217–222, 1 jun. 2019.

ZHOU, C. H. *et al.* Catalytic conversion of lignocellulosic biomass to fine chemicals and fuels. **Chemical Society Reviews**, v. 40, n. 11, p. 5588–5617, 17 out. 2011.

APÊNDICE A – DADOS DAS VARIAÇÕES NOS PARÂMETROS COM OS RESPECTIVOS RENDIMENTOS DOS PRODUTOS NO PROCESSO DA PIRÓLISE AVALIADOS PELOS ARTIGOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA

Referência	Biomassa	Massa	Reator	Temperatura ^a	Taxa de aquecimento ^b	Tempo de residência ^c	Tamanho de partícula ^d	Fluxo do gás de arraste ^e	Rendimento (%)								
									Biochar	Bio-óleo	Biogás						
(Yu; Liu; Millan, 2023)	Madeira de <i>Pinus</i>	1 g	Leito fixo	350	100	30	0,5 - 1	N ₂ - 200	29,00 ^f	41,00 ^f	30,50 ^f						
				500					16,00 ^f	48,50 ^f	35,00 ^f						
				650					14,00 ^f	48,00 ^f	38,00 ^f						
				800					13,00 ^f	47,00 ^f	39,50 ^f						
				350			2		36,00 ^f	35,50 ^f	28,50 ^f						
				500					17,50 ^f	48,50 ^f	34,50 ^f						
				650					17,00 ^f	48,00 ^f	35,50 ^f						
				800					16,00 ^f	47,50 ^f	37,00 ^f						
				350			5		41,50 ^f	32,00 ^f	27,00 ^f						
				500					18,00 ^f	49,50 ^f	32,50 ^f						
				650					17,50 ^f	49,00 ^f	34,50 ^f						
				800					17,00 ^f	48,50 ^f	36,00 ^f						
(Borel <i>et al.</i> , 2020)	Resíduo da indústria cervejeira	25 g	Leito fixo	450	-	30	N ₂ - 200	25,91	48,03	26,06							
								30	25,10	56,40	18,50						
								50	27,96	56,99	15,05						
				550				10	29,31	56,96	13,73						
								30	26,79	56,62	16,59						
								50	27,00	56,13	16,87						
				650				10	27,26	54,26	18,48						
								30	19,90	60,65	19,45						
								50	26,11	58,23	15,66						
				(Ngo; Kim; Kim, 2014)				Casca de palmeira	5 g	Leito fixo	339	20	8	-	57,66	30,80	11,54
											360		4		60,29	30,86	8,85

						12			52,21	33,53	14,26
						2,35			55,21	33,47	11,32
				410		8			46,71	35,44	17,85
						13,7			48,80	35,55	15,65
				460		4			48,18	37,83	13,99
						12			43,00	40,24	16,76
				480		8			46,01	36,91	17,08
(Yu <i>et al.</i> , 2019)	<i>Chamaecy paris obtusa</i>	100 g	Leito fixo	350	10,0-15,0	60	-	N ₂ - 2000	32,70	55,80	11,50
				400					27,90	59,10	13,00
				500					23,30	61,70	15,00
				600					20,70	63,80	15,50
(Ningbo <i>et al.</i> , 2015)	Serragem de <i>Pinus</i>	24,5 g min ⁻¹	Tipo rosca	550	-	6	1-2	N ₂ - 50	20,70 ^f	51,70	22,60
						3			45,07 ^f	28,86	18,07
				600		4			44,01	30,68	13,50
						5			38,00 ^f	34,00 ^f	18,00 ^f
						6			21,36	51,70	22,00 ^f
						7			10,55 ^f	56,97	24,48
				650					22,00 ^f	42,00 ^f	31,00 ^f
				750		6			23,00 ^f	33,00 ^f	38,00 ^f
				800					21,00 ^f	30,00 ^f	45,00 ^f
				900					24,50 ^f	18,00	54,50
(Abbas <i>et al.</i> , 2018)	Casca de arroz	30 g	Leito fixo	300	10	60	1,68 - 0,289	N ₂ - 20	57,13±5,3 7	13,69±0,9 1	25,64±0,9 3
				400					44,59±3,2 2	16,53±1,7 7	28,45±1,2 7
				500					39,14±2,2 7	18,72±2,3 3	36,71±3,2 3
						15			40,58±1,2 9	17,89±1,5 3	33,87±2,1 9

						30			39,96±2,7 7	18,08±0,6 5	35,50±1,9 5	
						60			39,14±2,2 7	18,72±2,3 3	36,71±3,2 3	
						90			38,06±2,6 7	19,00±0,8 7	38,23±2,4 2	
					1	60	10		40,62±1,8 9	15,45±1,6 2	35,74±1,2 5	
					2				40,59±2,1 5	21,38±2,0 7	31,85±2,3 4	
					5				40,06±2,8 3	19,05±1,8 9	34,37±1,2 2	
									N ₂ - 50	39,56±2,2 7	20,50±1,5 9	37,28±1,8 2
									N ₂ - 100	37,98±1,9 9	22,54±1,3 8	37,95±2,1 9
									N ₂ - 200	36,09±2,1 1	22,29±1,9 3	39,78±3,5 4
										39,14±2,2 7	18,72±2,3 3	36,71±3,2 3
									0,289- 0,149	37,92±2,2 6	20,15±0,8 3	38,87±2,0 7
									0,149 - 0,074	36,37±1,5 7	21,58±1,3 4	36,38±1,7 3
									<0,074	33,96±1,7 6	24,67±2,2 6	35,79±2,5 9
			600			1,68 - 0,289	37,43±1,8 6	18,51±1,8 6	39,33±2,3 7			

				700					37,19±2,05	17,84±2,14	42,50±4,58		
(Wulandari <i>et al.</i> , 2020)	Resíduo da produção de etanol celulósico de casca de arroz	500 g	Batelada	450	20	-	-	N ₂ - 20	58,20 ^f	18,03 ^f	23,77 ^f		
								N ₂ - 60	55,74 ^f	20,49 ^f	23,77 ^f		
								N ₂ - 100	56,56 ^f	19,67 ^f	23,77 ^f		
								N ₂ - 150	55,74 ^f	20,49 ^f	23,77 ^f		
(Paenpong; Pattiya, 2016)	Rizoma de mandioca	120-150 g h ⁻¹	Leito fluidizado	400	-	50-70	0,225-0,425	N ₂ - 500	34,44 ^f	45,00 ^f	20,56 ^f		
				450					27,78 ^f	48,89 ^f	23,33 ^f		
				500					24,44 ^f	50,00 ^f	25,56 ^f		
				550					23,33 ^f	48,34 ^f	28,33 ^f		
(Gupta; Gupta; Mondal, 2019)	Serragem de <i>Tectona grandis</i>	20 g	Leito fixo	400	-	60	0,18-0,25	N ₂ - 150	37,42	42,24	20,34		
				500					35,00 ^f	44,00 ^f	21,00 ^f		
				600					27,20	48,80	23,80		
									N ₂ - 200	26,00 ^f	48,00 ^f	26,00 ^f	
				700				0,42-0,60	N ₂ - 150	N ₂ - 250	24,27	45,78	29,95
										0,25-0,42	30,00 ^f	47,00 ^f	23,00 ^f
										0,18-0,25	29,00 ^f	48,00 ^f	23,00 ^f
										27,20	48,80	24,00 ^f	
26,45	47,25	26,30											
(Tan; Abdullah; Hameed, 2017)	Casca de <i>Durrio zabethinus Linn</i>	3 g	Leito fixo	250	-	10	1-2	-	39,25	26,05	34,70		
				350					33,00 ^f	34,00 ^f	31,00 ^f		
				450					26,00 ^f	38,00 ^f	36,00 ^f		
				550					28,30	46,29	25,41		
									<0,5	26,79 ^f	44,00 ^f	29,21	
									0,5- 1	28,00 ^f	44,00 ^f	28,00 ^f	
									2-5	28,00 ^f	44,00 ^f	28,00 ^f	
				650					1-2	23,51	57,45	19,04	
(Açikalin; Karaca, 2017)	Casca de noz	10 g	Leito fixo	350	40	30	1-2	N ₂ - 250	33,93	44,11	21,96		
				425					29,51	45,38	25,11		

				500	10			N ₂ - 50	27,00 ^f	48,00	24,00 ^f
								N ₂ - 150	27,00	48,20	24,58
								N ₂ - 250	27,00 ^f	45,00 ^f	26,00 ^f
								N ₂ - 350	27,00 ^f	44,50 ^f	26,00 ^f
								N ₂ - 450	27,00	43,52	29,95
								N ₂ - 250	29,00	47,14	23,86
				27,20					47,39	25,41	
				27,45					45,10	27,45	
				27,20					44,80	28,00	
				26,99					44,67	28,34	
				25,00					44,80	28,00	
				575				30	25,85	42,23	31,92
650											
(Ferreira. <i>et al.</i> , 2020)	Cacho de fruto vazio de palma	70 g	Leito fixo	459	10	60	<2	N ₂ - 400	44,58	37,46	17,95
				500				N ₂ - 300	40,84	39,93	19,22
				600				N ₂ - 500	32,02	40,94	27,03
								N ₂ - 259	29,51	43,57	26,92
				700				N ₂ - 400	30,00	41,99	28,00
								N ₂ - 541	32,58	40,00	27,41
								N ₂ - 300	29,24	41,61	29,15
								N ₂ - 500	28,14	31,78	40,08
741	N ₂ - 400	27,92	34,99	37,08							
(Hasan <i>et al.</i> , 2017)	Madeira Mallee	-	Reator com moagem	250	-	-	-	-	59,50 ^f	25,00 ^f	15,50 ^f
				300					40,50 ^f	43,33 ^f	16,17 ^f
				350					32,00 ^f	49,00 ^f	19,00 ^f
				400					32,00 ^f	52,00 ^f	16,00 ^f
				450					26,00 ^f	50,67 ^f	23,33 ^f
				500					24,00 ^f	44,83 ^f	31,17 ^f
				550					21,00 ^f	41,67 ^f	37,33 ^f
	20 g			300	25	-	0,3 - 0,6	N ₂ - 0	28,31	45,69	26,00

(El Farissi; Talhaoui; Bachiri, 2022)	Sementes <i>Pistacia lentiscus L.</i>		Leito fixo	350					28,00 ^f	54,00 ^f	18,00 ^f		
				400					26,00 ^f	56,00 ^f	18,00 ^f		
				425					25,00 ^f	63,00 ^f	12,00 ^f		
				450					25,73	62,76	11,51		
				475					0,075 - 0,15	30,00 ^f	49,00	21,00 ^f	
									0,15 - 0,3	27,93 ^f	54,07	18,00 ^f	
									0,3 - 0,6	5	24,20	54,20	21,60
										10	25,00 ^f	59,00 ^f	16,00 ^f
										15	26,00 ^f	59,00 ^f	15,00 ^f
										20	28,00	62,00 ^f	10,00 ^f
										25	24,14	63,86	12,00
									30	28,00 ^f	56,00 ^f	16,00 ^f	
				25					0,6 - 1,2	30,00 ^f	60,00 ^f	10,00 ^f	
									0,3 - 0,6	21,00 ^f	58,00 ^f	21,00 ^f	
500				19,00 ^f	56,00 ^f	25,00 ^f							
550													
(Solar <i>et al.</i> , 2016)	Madeira de <i>Pinus</i>	0,65 g min ⁻¹	Tipo rosca	300-750	-	32	0,5 - 2	-	30,70	22,20	47,10		
				300-900					28,80	20,40	50,80		
				900-900					21,00	9,70	69,30		
				300-750					28,90	22,40	48,70		
				300-900					25,30	17,00	57,70		
				900-900					19,30	5,80	74,90		
									64				
(Chandrasekaran; Ramachandran; Subbiah, 2018)	Madeira de <i>Prosopis juliflora</i>	20 ± 0,01	Leito fixo	400	-		N ₂ - 100	0,2 - 0,5	33,50	27,80	38,70		
								0,5 - 1	34,60	28,30	37,10		
								1 - 2	36,80	31,00	32,20		
								0,2 - 0,5	10	30,10	29,30	40,60	
									0,5 - 1	31,90	31,40	36,70	
								1 - 2	20	32,20	34,10	33,70	
										0,2 - 0,5	26,50	32,50	41,00
								0,5 - 1	28,20	34,60	37,20		

				500	5		1 - 2		29,40	37,20	33,40			
							0,2 - 0,5		30,10	29,30	40,60			
							0,5 - 1		32,10	30,90	37,00			
							1 - 2		34,30	30,70	35,00			
					10		10		0,2 - 0,5	26,30	31,20	42,50		
					0,5 - 1				25,60	32,90	41,50			
					1 - 2				28,90	35,20	35,90			
					0,2 - 0,5				23,70	35,20	41,10			
				20	20		0,5 - 1		25,40	36,80	37,80			
				1 - 2			26,20		38,30	35,50				
				0,2 - 0,5			28,50		24,60	46,90				
				0,5 - 1			29,70		26,40	43,90				
				600	5		1 - 2		32,00	28,40	39,60			
							0,2 - 0,5		25,50	27,90	46,60			
							0,5 - 1		26,20	28,10	45,70			
							1 - 2		28,10	30,40	41,50			
10	10	0,2 - 0,5	21,00		33,60	45,40								
0,5 - 1		22,40	34,70		42,90									
1 - 2		24,20	35,90		39,90									
0,2 - 0,5		56,89	12,09		28,02									
(Liu <i>et al.</i> , 2018)	Casca de amendoim	30 g	Leito fixo	300	10	60	0,3 - 2	N ₂ - 20	39,28 ^f	17,85 ^f	35,87 ^f			
				400					38,39 ^f	24,10 ^f	33,01 ^f			
				500	1				37,50 ^f	24,10 ^f	33,05 ^f			
									2	35,71 ^f	23,21 ^f	34,08 ^f		
									5	38,39 ^f	20,54 ^f	30,07 ^f		
									10	36,60 ^f	21,43 ^f	34,97 ^f		
					10				15	31,25 ^f	32,28	33,17 ^f		
										30	32,14 ^f	25,57 ^f	36,94 ^f	
										60	<0,075	33,04 ^f	23,21 ^f	38,24 ^f
											0,075 - 0,15			
				0,15 - 0,3										

									33,93 ^f	21,39	34,81 ^f	
								0,3 - 2	N ₂ - 50	31,25 ^f	22,50 ^f	38,75 ^f
									N ₂ - 100	31,25 ^f	26,87	40,00 ^f
									N ₂ - 200	30,00 ^f	25,46	41,25 ^f
						90			N ₂ - 20	32,14 ^f	24,10 ^f	38,41 ^f
				600		60				33,05 ^f	18,25	40,77
				700							30,19	16,72
(Saikia <i>et al.</i> , 2015)	<i>Cana-vieira</i> (<i>A. donax</i> L.)	10 g	Leito fixo	350	10	30	<0,2	N ₂ - 0	45,77 ± 0,01	16,67 ± 0,01	28,74 ± 0,04	
				400					43,87 ± 0,02	18,26 ± 0,11	30,61 ± 0,10	
				450					42,91 ± 0,01	20,13 ± 0,02	32,97 ± 0,03	
				500					40,51 ± 0,05	21,54 ± 0,39	34,58 ± 0,04	
				550					35,24 ± 0,03	19,51 ± 0,09	41,03 ± 0,08	
				600					33,11 ± 0,02	17,59 ± 0,20	44,59 ± 0,06	
				650					32,98 ± 0,01	16,65 ± 0,04	45,16 ± 0,01	
				350					42,38 ± 0,05	18,64 ± 0,01	29,96 ± 0,04	
				400	38,04 ± 0,04				22,49 ± 0,01	31,54 ± 0,06		
				450	33,72 ± 0,14				25,91 ± 0,07	33,75 ± 0,03		
					33,50 ± 0,03				26,18 ± 0,10	36,29 ± 0,07		

				500				N ₂ - 50	36.78 ± 0.01	18.08 ± 0.13	30.58 ± 0.01						
								N ₂ - 100	32.46 ± 0.01	22.96 ± 0.03	32.62 ± 0.03						
								N ₂ - 150	31.61 ± 0.05	25.21 ± 0.04	34.53 ± 0.01						
								N ₂ - 200	31.36 ± 0.09	22.53 ± 0.01	39.62 ± 0.07						
								N ₂ - 250	30.81 ± 0.01	19.41 ± 0.03	43.51 ± 0.01						
				550				N ₂ - 0	32,15 ± 0,01	23,82 ± 0,01	38,11 ± 0,12						
									30,18 ± 0,03	21,79 ± 0,04	40,12 ± 0,09						
									29,8 ± 0,02	21,02 ± 0,12	41,23 ± 0,05						
				600													
				650													
(Wang <i>et al.</i> , 2022)	Madeira de <i>Pinus</i>	0,5 g	Leito fixo	500	40	30		N ₂ - 800	21,00 ^f	27,50 ^f	51,50 ^f						
									21,00 ^f	25,00 ^f	54,00 ^f						
									21,00 ^f	24,20 ^f	54,80 ^f						
				600					17,50 ^f	28,20 ^f	54,30 ^f						
									18,00 ^f	27,00 ^f	55,00 ^f						
									17,80 ^f	24,90 ^f	57,30 ^f						
				700					15,80 ^f	25,00 ^f	59,20 ^f						
									16,00 ^f	23,00 ^f	61,00 ^f						
									16,50 ^f	17,00 ^f	66,50 ^f						
				800					13,50 ^f	20,00 ^f	66,50 ^f						
									14,50 ^f	16,90 ^f	68,60 ^f						
									15,00 ^f	15,50 ^f	69,50 ^f						
				900					12,80 ^f	18,00 ^f	69,20 ^f						
									13,90 ^f	16,20 ^f	69,90 ^f						

							20		14,30 ^f	15,30 ^f	70,40 ^f								
(Mishra; Kumar; Mohanty, 2020)	Semente de <i>Samanea saman</i>	50 g	Semi-batelada	450	80	-	0,5	N ₂ - 100	37,50 ^f	37,50 ^f	25,00 ^f								
				500	50				37,00 ^f	35,50 ^f	27,50 ^f								
					80				30,80 ^f	41,00 ^f	28,20 ^f								
									1,0	30,50 ^f	41,30 ^f	28,20 ^f							
									1,2	34,80 ^f	37,60 ^f	27,60 ^f							
									1,5	41,00 ^f	33,80 ^f	25,20 ^f							
					100				24,60 ^f	40,00 ^f	35,40 ^f								
				120	22,00 ^f				34,80 ^f	43,20 ^f									
				550	80				0,5	27,00 ^f	44,00 ^f	29,00 ^f							
				600						21,00 ^f	36,00 ^f	43,00 ^f							
(Bhattacharjee; Biswas, 2018)	<i>Alternanthera philoxeroides</i>	-	Leito fixo	350	25	-	-	N ₂ - 100	50,56	32,13	12,71								
				375					46	45,05	33,96	13,74							
				400					44	39,67	35,32	15,77							
				425					41	36,01	38,14	16,38							
				450					37	34,21	40,10	16,48							
									35	N ₂ - 200	30,33	42,23	20,54						
									31		N ₂ - 300	28,37	38,48	21,46					
									29	N ₂ - 400	27,01	36,25	23,77						
									26	N ₂ - 500	26,23	33,96	23,89						
									50	N ₂ - 100	28,74	43,15	21,09						
				75					26,28		40,02	21,02							
				100					24,67		37,13	21,03							
				475					31,27		38,77	17,98							
				500					28,61		36,42	19,81							
				525					26,57		34,74	21,58							
				550					23,70	31,93	23,14								
				(Demiral; Kul, 2014)						20 g	Leito fixo	400	10	30	0,425 - 0,6	N ₂ - 0	35,20	20,60	38,00
												450					32,50 ^f	21,30 ^f	39,00 ^f

	Casca de caroço de damasco			500	50				31,00 ^f	22,60	40,00 ^f	
				550					29,40	21,40	43,00	
				400					28,70	23,00	30,80	
				450					28,00 ^f	24,70 ^f	31,00 ^f	
									26,50 ^f	25,00	32,00 ^f	
				500					N ₂ - 50	26,50 ^f	24,00 ^f	32,80
									N ₂ - 100	26,50 ^f	25,00 ^f	33,00 ^f
									N ₂ - 150	26,50 ^f	26,30	33,00 ^f
									N ₂ - 200	28,00 ^f	24,00 ^f	36,30
				550								N ₂ - 0
(Sirjanusorn; Sriprateep; Pattiya, 2013)	Rizoma de mandioca	300 g	Tipo rosca	500	-	-	0,25 - 0,425	N ₂ - 2000	22,00 ^f	38,30 ^f	39,70 ^f	
				550					24,00 ^f	50,00 ^f	26,00 ^f	
				600					20,50 ^f	48,00 ^f	31,50 ^f	
				650					<0,25	20,00 ^f	26,80	53,20 ^f
									0,25 - 0,425	6,50 ^f	43,05	50,45 ^f
				700					0,425 - 0,6	16,25 ^f	37,84	45,91 ^f
	0,25 - 0,425	17,00 ^f	34,00 ^f	49,00 ^f								
(Subagyono <i>et al.</i> , 2022)	Madeira <i>Macaranga gigantea</i>	250 g	Batelada	300	-	30	0,37	-	54,00 ^f	31,00 ^f	15,00 ^f	
									15	52,50 ^f	31,50 ^f	16,00 ^f
				350					30	41,50 ^f	35,00 ^f	23,50 ^f
									45	38,00 ^f	40,00 ^f	22,00 ^f
				400					30	40,00 ^f	38,00 ^f	22,00 ^f
(Nawaz <i>et al.</i> , 2023)	Casca de noz d'água	10 ± 0.5 g	Leito fixo	400	25	-	0,21-0,25	N ₂ - 100	35,90	36,21	27,90	
				500					31,35	38,71	29,88	
				600					10	38,00	37,81	24,18
									15	32,05	40,18	27,70
									25	30,07	42,16	27,70
									40	27,51	38,00	34,48

				700	25				15,67	41,01	43,25
(Bhattacharjee; Biswas, 2019)	Bagaço de laranja	30 g	Semi-batelada	350	25	30	0,425	N ₂ - 100	56,17	16,38	20,76
				375					52,86 ^f	17,14 ^f	21,79 ^f
				400					49,64 ^f	17,86 ^f	23,93 ^f
				425					46,79 ^f	19,64 ^f	25,00 ^f
				450					42,14 ^f	21,43 ^f	27,86 ^f
				475					38,57 ^f	23,21 ^f	29,29 ^f
				500					35,70 ^f	25,36 ^f	28,93 ^f
				525					33,02	28,04	31,37
					50			31,80 ^f	30,00 ^f	32,00 ^f	
					75			26,66	34,03	31,90	
								N ₂ - 200	25,80 ^f	35,53	31,00 ^f
								N ₂ - 300	24,80 ^f	34,48	34,00 ^f
								N ₂ - 400	23,00 ^f	33,00 ^f	36,00 ^f
								N ₂ - 500	22,37	30,41	39,58
								N ₂ - 100	24,87	33,62	34,89
					550				30,46	27,56	34,66
	575	28,79 ^f	26,42 ^f	35,36 ^f							
	600	28,26	26,20	37,83							
(Omvesh <i>et al.</i> , 2023)	Agulhas de pinheiro	10 g	Leito fixo	231,82	10	60	0,25 - 0,50	N ₂ - 100	58,92	20,92	20,16 ^f
				300		30		N ₂ - 50	50,56	25,43	24,01 ^f
						90		N ₂ - 150	45,69	23,66	30,65 ^f
				400		9,55		N ₂ - 50	48,71	29,20	22,09 ^f
						60		N ₂ - 150	46,36	26,65	26,99 ^f
								N ₂ - 100	37,48	31,90	30,62 ^f
								N ₂ - 15,91	38,96	34,33	26,71 ^f
								N ₂ - 100	37,87	32,74	29,39 ^f

				500				N ₂ - 184,09	35,08	30,02	34,90 ^f							
								110,45	N ₂ - 100	38,61	30,73	30,66 ^f						
								30	N ₂ - 50	34,40	37,91	27,69 ^f						
								90	N ₂ - 150	32,13	35,34	32,53 ^f						
								60	N ₂ - 50	35,07	35,52	29,41 ^f						
								568,18	N ₂ - 150	35,32	30,17	34,51 ^f						
(Hosseinzaei <i>et al.</i> , 2022)	Casca de pistache	2-3 g	Leito fixo	350	10	30	0,3-0,5	N ₂ - 150	31,00	46,00	23,00							
				400					28,00	47,00	26,00							
				550					22,00	50,00	29,00							
	Casca de laranja			300					44,00	34,00	22,00							
				400					34,00	32,00	34,00							
				550					27,00	40,00	34,00							
	Pétalas de açafão			300					50,00	18,00	32,00							
				400					39,00	22,00	39,00							
				500					35,00	20,00	45,00							
	(Shah <i>et al.</i> , 2021)			Casca de noz papel					300 g	Leito fixo	375	20	35	1,5-2,5	N ₂ - 96	40,15 ^f	24,63 ^f	30,28 ^f
											450					31,74 ^f	28,00 ^f	32,29 ^f
											550	10		0,5-1,5		28,20 ^f	28,27 ^f	29,25 ^f
23,42 ^f		29,95 ^f	35,64 ^f															
20		1,5-2,5	N ₂ - 48		24,87 ^f	28,92 ^f	33,79 ^f											
			N ₂ - 96		24,28 ^f	31,38 ^f	34,82 ^f											
50		2,5 - 3,0	N ₂ - 150		23,07 ^f	28,46 ^f	35,24 ^f											
					24,85 ^f	26,89 ^f	33,22 ^f											
20		1,5-2,5	N ₂ - 96		24,01 ^f	31,36 ^f	34,81 ^f											
					23,49 ^f	27,06 ^f	38,75 ^f											
650		20	1,5-2,5	N ₂ - 96	23,10 ^f	23,13 ^f	40,76 ^f											
					38,97 ^f	25,38 ^f	32,55 ^f											
750	20	1,5-2,5	N ₂ - 96	30,96 ^f	29,38 ^f	34,72 ^f												
				375	38,97 ^f	25,38 ^f	32,55 ^f											
Casca de noz fina	450	20	1,5-2,5	N ₂ - 96	30,96 ^f	29,38 ^f	34,72 ^f											

				550	10	0,5-1,5		27,70 ^f	29,57 ^f	31,43 ^f	
								22,25 ^f	31,43 ^f	37,44 ^f	
				20	1,5-2,5	N ₂ - 48	23,42 ^f	29,46 ^f	35,33 ^f		
						N ₂ - 96	22,85 ^f	32,63 ^f	36,48 ^f		
						N ₂ - 150	22,01 ^f	29,86 ^f	39,80 ^f		
				50	2,5 - 3,0	N ₂ - 96	23,42 ^f	28,21 ^f	35,02 ^f		
							22,77 ^f	31,67 ^f	36,54 ^f		
				20	1,5-2,5	N ₂ - 96	22,31 ^f	28,19 ^f	40,40 ^f		
							22,21 ^f	23,50 ^f	42,37 ^f		
				650	20	1,5-2,5	N ₂ - 96	35,09 ^f	26,86 ^f	33,07 ^f	
	750	29,19 ^f	30,25 ^f	36,58 ^f							
	375	20	1,5-2,5	N ₂ - 96	26,29 ^f	30,74 ^f	32,41 ^f				
	450				21,79 ^f	32,33 ^f	39,29 ^f				
	Casca de noz média				550	10	0,5-1,5		22,75 ^f	31,76 ^f	36,09 ^f
									22,31 ^f	33,25 ^f	37,36 ^f
					20	1,5-2,5	N ₂ - 96	21,22 ^f	30,47 ^f	40,74 ^f	
							N ₂ - 150	22,86 ^f	30,15 ^f	37,03 ^f	
								21,87 ^f	32,96 ^f	37,82 ^f	
					50	2,5 - 3,0	N ₂ - 96	21,92 ^f	29,00 ^f	40,97 ^f	
								21,97 ^f	24,38 ^f	43,61 ^f	
650					20	1,5-2,5	N ₂ - 96	32,43 ^f	28,75 ^f	34,77 ^f	
750								26,39 ^f	31,25 ^f	37,36 ^f	
375					20	1,5-2,5	N ₂ - 96	25,44 ^f	31,97 ^f	35,49 ^f	
450	20,69 ^f	34,23 ^f	41,83 ^f								
Casca de noz dura				550	10	0,5-1,5		21,96 ^f	33,51 ^f	38,22 ^f	
								21,08 ^f	35,32 ^f	39,42 ^f	
				20	1,5-2,5	N ₂ - 96	20,85 ^f	32,30 ^f	42,40 ^f		
						N ₂ - 150	21,68 ^f	32,00 ^f	38,09 ^f		
							22,04 ^f	34,32 ^f	39,92 ^f		
				50	2,5 - 3,0	N ₂ - 96	21,68 ^f	32,00 ^f	38,09 ^f		
							22,04 ^f	34,32 ^f	39,92 ^f		

				650	20				20,29 ^f	29,88 ^f	43,71 ^f							
				750					20,00 ^f	26,13 ^f	44,79 ^f							
(Chen <i>et al.</i> , 2016)	<i>Populus alba</i>	10 g	Leito fixo	400	10	10	0,37-0,25	N ₂ - 200	34,85 ^f	37,62	27,53 ^f							
					30				32,90 ^f	40,82	26,28 ^f							
					50				32,00 ^f	41,83	26,17 ^f							
				450	10				32,00 ^f	39,90 ^f	28,10 ^f							
					30				30,55 ^f	41,75 ^f	27,70 ^f							
					50				28,40 ^f	42,60 ^f	29,00 ^f							
				500	10				30,10 ^f	41,53	28,37 ^f							
					30				28,40 ^f	42,16	29,44 ^f							
					50				27,10 ^f	43,54	29,36 ^f							
				550	10				29,60 ^f	39,40 ^f	31,00 ^f							
					30				27,70 ^f	39,80 ^f	32,50 ^f							
					50				26,90 ^f	42,25 ^f	30,85 ^f							
				600	10				27,50 ^f	39,25	33,25 ^f							
					30				27,00 ^f	39,31	33,69 ^f							
					50				26,50 ^f	41,67	31,83 ^f							
				(Mohseni-Roodbari <i>et al.</i> , 2022)	Resíduo de linhaça				120 g	Leito fixo	320	20	60	0,21	N ₂ - 125	53,40	32,50	14,10
															N ₂ - 50	47,60	37,20	15,20
											350			0,545	N ₂ - 200	43,40	40,10	16,50
0,149	N ₂ - 50	45,20	37,00			17,80												
	N ₂ - 200	49,10	36,80			14,10												
450	1,68	N ₂ - 125	30,80			53,80	15,40											
	0,21	N ₂ - 0	32,00			50,60	17,40											
		N ₂ - 125	31,00			52,00	17,00											
		N ₂ - 250	31,30			52,20	16,50											
	0,12	N ₂ - 125	33,50	55,50	11,00													

							0,545	N ₂ - 50	30,30	50,70	19,20
				550				N ₂ - 200	30,30	49,50	20,20
							0,149	N ₂ - 50	29,10	54,50	16,40
				580				N ₂ - 200	32,30	55,90	11,80
							0,21	N ₂ - 125	36,90	52,90	10,20
(Soni; Karmee, 2020)	Serragem	1000 g	Batelada	400	34	-	<2	N ₂ - 100	45,0 ± 1,0	30,6 ± 0,9	24,4 ± 0,8
				450					41,7 ± 0,6	32,5 ± 1,0	25,8 ± 1,6
				500					38,6 ± 0,7	34,9 ± 1,0	26,5 ± 1,5
				550					37,0 ± 0,6	28,5 ± 1,3	34,5 ± 0,6
				600					35,6 ± 1,1	19,7 ± 0,6	44,7 ± 1,7
		25 g min ⁻¹	Contínuo	500	-				27,59	41,05	31,36

^a (°C); ^b (°C min⁻¹); ^c (min); ^d (mm); ^e (mL min⁻¹); ^f Dados retirados de gráficos.

**APÊNDICE B – DADOS DAS BIOMASSAS E SUAS RESPECTIVAS ANÁLISES IMEDIATA, ELEMENTAR E QUÍMICA
DISPONÍVEIS NOS ARTIGOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA**

Referência	Biomassa	Umidade (%)	Material Volátil (%)	Carbono fixo (%)	Cinza (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Extrativos (%)	Lignina (%)	Celulose (%)	Hemicelulose (%)
(Yu; Liu; Millan, 2023)	Madeira de <i>Pinus</i>	3,2	85,5	10,7	0,6	47,1	6,3	42,5	0,03	0,3	-	-	-	-
(Borel <i>et al.</i> , 2020)	Resíduo da indústria cervejeira	3,97 ± 0,00	83,30 ± 0,29	9,51 ± 0,31	3,22 ± 0,03	47,2 ± 1,3	7,2 ± 0,1	37,6 ± 1,7	3,6 ± 0,4	1,1 ± 0,0	5,26 ± 0,06	29,37 ± 4,03	15,14 ± 0,03	50,23 ± 0,03
(Ngo; Kim; Kim, 2014)	Casca de palmeira	2	-	-	5,85	50,1	6,9	38,2	2,4	-	-	-	-	-
(Yu <i>et al.</i> , 2019)	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	6,49	79,25	14,1	0,15	51,88	6,21	41,76	0,16	-	-	-	-	-
(Ningbo <i>et al.</i> , 2015)	Serragem de <i>Pinus</i>	3,93	76,85	18,88	0,34	44,75	6,31	42,,94	1,68	0,05	-	-	-	-
(Abbas <i>et al.</i> , 2018)	Casca de arroz	5,95	63,46	16,89	13,7	42,7	6,01	35,97	1,2	0,42	-	-	-	-
(Wulandari <i>et al.</i> , 2020)	Resíduo da produção de etanol celulósico de casca de arroz	3,1	56	24	20	43,2	4,9	33,8	1,4	-	12,8	37,7	28,5	11,5
(Paenpong; Pattiya, 2016)	Rizoma de mandioca	-	77,91	14,07	8,02	45,2	6,43	47,45	0,91	0,01	-	-	-	-
(Gupta; Gupta; Mondal, 2019)	Serragem de <i>Tectona grandis</i>	3,87	78,17	13,43	3,53	49,17	5,93	43,87	1,03	-	-	-	-	-

(Tan; Abdullah; Hameed, 2017)	Casca de <i>Durrio zabethinus</i> Linn	4,96	70,28	21,65	3,11	40,98	4,44	52,93	1,31	0,34	11,09	15,45	60,45	13,01
(Açikalin; Karaca, 2017)	Casca de noz	2,57	78,04	18,75	0,64	48,34	6,16	44,78	0,36	0,03	-	-	-	-
(Ferreira. et al., 2020)	Cacho de fruto vazio de palma	3,92 ± 0,4	81,49 ± 1,0	10,45 ± 1,1	4,14 ± 0,0	50,24 ± 0,5	8,06 ± 0,2	36,03 ± 1,1	0,65 ± 0,1	0,62 ± 0,4	-	37,32 ± 3,3	41,37 ± 2,8	15,68 ± 5,1
(Hasan et al., 2017)	Madeira <i>Mallee</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(El Farissi; Talhaoui; Bachiri, 2022)	Sementes <i>Pistacia lentiscus</i> L.	-	80,01	8,61	5,77	62,66	5,62	25,3	2,23	0,49	-	-	-	-
(Solar et al., 2016)	Madeira de <i>Pinus</i>	10,8	64,4	23,6	1,2	57,7	7,2	34,8	0,3	-	7	49	-	-
(Chandrasekaran; Ramachandran; Subbiah, 2018)	Madeira <i>Prosopis juliflora</i>	9,83 ± 1,41	68,84 ± 0,66	18,53 ± 0,49	2,77 ± 0,33	46,05 ± 1,08	7,29 ± 0,95	44,89 ± 2,04	1,70 ± 0,10	0,07 ± 0,01	4,3	28,3	49,4	18
(Liu et al., 2018)	Casca de amendoim	6,24	72,9	18,84	2,02	47,88	6,12	43,2	0,32	0,46	-	-	-	-
(Saikia et al., 2015)	<i>Cana-vieira</i> (<i>A. donax</i> L.)	8,50	74,30	11,70	5,30	42,00	3,20	36,30	1,50	-	-	-	-	-
(Wang et al., 2022)	Madeira de <i>Pinus</i>	8,52	79,42	11,2	0,86	47,25	6,38	46,25	0,12	-	-	-	-	-
(Mishra; Kumar; Mohanty, 2020)	Semente de <i>Samanea saman</i>	6,19 ± 0,16	76,00 ± 0,67	14,74 ± 0,13	3,06 ± 0,14	48,46	6,75	37,47	7,3	-	30,66 ± 0,39	10,59 ± 0,16	30,81 ± 0,17	26,55 ± 0,17

(Chen <i>et al.</i> , 2016)	Madeira de <i>Populus alba</i>	-	78,26	20,61	1,13	48,36	5,93	43,94	0,52	0,12	-	24,49	49,31	22,67
(Mohseni-Roodbari <i>et al.</i> , 2022)	Resíduo de linhaça	6,63	86,812	0,269	6,289	55,94	5,05	26,1	6,81	6,1	-	-	-	-
(Soni; Karmee, 2020)	Serragem	8,08	76,77	5,89	9,26	41,38	4,94	53,02	0,66	-	-	-	-	-