PIRÓLISE DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Ivaldir José Tamagno JUNIOR[1], **Michele Di DOMENICO**[1]

[1]Departamento Acadêmico de Engenharias
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus* Francisco Beltrão
Francisco Beltrão – Paraná - Brasil

E-mails: ivaldirjunior@alunos.utfpr.edu.br, micheled@utfpr.edu.br

Resumo: *Biomassas lignocelulósicas têm sido muito estudadas como substitutas aos combustíveis fosseis. A pirólise, processo termoquímico, trouxe enorme vantagens quanta à conversão dessas biomassas em energia. Neste artigo é proposto averiguar na literatura o estado da arte dos artigos que tratam do processo pirolítico de biomassas lignocelulósicas e entender os principais parâmetros do processo através de uma revisão sistemática da literatura. Esta revisão foi realizada a partir do software StArt, seguindo um protocolo de três etapas: planejamento, execução e sumarização. A partir desta revisão, inicialmente foram obtidos do banco de dados 542 artigos, e, ao final, restaram apenas 36 artigos, sendo àqueles excluídos os que não tratavam de biomassas lignocelulósicas, ou ainda, devido ao uso de processos de aquecimento por microondas. Os parâmetros identificados como os mais estudados foram a temperatura, o tempo de residência, a taxa de aquecimento e o tamanho de partícula. Dos 36 artigos, 34 estudaram o efeito da temperatura no processo de geração de produto, mostrando que esse parâmetro é um dos mais importantes para a pirólise. Ademais pode-se analisar como está a tendência das pesquisas na área da pirólise, as quais, atualmente, estão focadas em tipos de aquecimento não-convencionais, processos que envolvem diferentes biomassas ou processos catalisados.*

Palavras-chave: *Pirólise; Parâmetros operacionais; Biomassa lignocelulósica; Revisão sistemática*

INTRODUÇÃO

O processo de industrialização global foi impulsionado pelo uso de máquinas à vapor que utilizam a queima do carvão como combustível. Este processo foi de extrema importância para o mundo pois desenvolveu diversos campos como o de transporte e a agricultura. Contudo, durante o passar do tempo, se tornou danoso ao meio ambiente, principalmente pela emissão de grandes quantidades de CO_2 na atmosfera, intensificando o aquecimento global. Com o aumento populacional, e consequente aumento na demanda de

energia, foi necessária a busca por fontes mais limpas para substituir essas que já estavam consolidadas no mercado.

Atualmente, a matriz energética mundial ainda apresenta como principais fontes o petróleo e o carvão mineral, que são tidas como finitas e possuem altas concentrações de poluentes. As fontes renováveis de energia, como as biomassas, são as mais promissoras para substituir estas fontes 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 CO_2 emitindo pela queima da biomassa, gerando um ciclo do carbono neutro.

Para o aproveitamento da biomassa, existem algumas rotas de transformação, dentre elas as rotas termoquímicas, bioquímicas e físico-químicas. Das rotas termoquímicas tem-se a combustão, que consiste na queima da biomassa; a gaseificação que gera um gás de síntese rico em hidrogênio; e a pirólise, que apresenta capacidade maior de exploração da biomassa por gerar três produtos: o *biochar*, o bio-óleo e biogás. A pirólise, escopo deste trabalho, utiliza uma atmosfera inerte, normalmente nitrogênio, e temperaturas entre 350-700°C para converter os compostos da biomassa (celulose, hemicelulose e lignina) em seus produtos. Este processo pode ser classificado de acordo com os parâmetros de operação em pirólise rápida, lenta e *flash*. A pirólise de biomassa lignocelulósica é um processo de conversão que vem sendo estudado nos últimos 10 anos, sendo ainda recente e faltando muito desenvolvimento em termos de pesquisa e principalmente aplicação.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é selecionar os artigos da literatura a partir de uma revisão sistemática sobre a pirólise de biomassas lignocelulósicas. A seleção foi baseada em artigos que avaliam o efeito das características das biomassas e dos parâmetros operacionais do processo na composição dos produtos gerados, a fim de entender quantos, quais e porque os artigos selecionados são importantes para esta revisão.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A pirólise, dentre todos os processos termoquímicos, apresenta-se como o método mais eficaz para a produção de produtos com alto valor energético a partir e resíduos sólidos, além de ser a primeira etapa de outros processos de conversão como a gaseificação e a com-

bustão (PANG et al., 2021). Diversos parâmetros de operação são fundamentais para a classificação do processo de pirólise, entre eles, a taxa de aquecimento, o tempo de residência, o tamanho de partícula da matéria-prima e a faixa de temperatura.

Em termos genéricos, a pirólise ocorre em três etapas (BORÉL, 2018): 1) secagem, que ocorre até 150 °C, e tem como objetivo evaporar a umidade livre presente nas biomassas; 2) pirólise primária, que ocorre de 200-600 °C, e tem como objetivo liberar a água intrínseca e os gases com baixo peso molecular, como CO e CO_2 (também, ocorre a decomposição das estruturas básicas da matéria-prima); 3) pirólise secundária, que ocorre de 300-900 °C, gerando o carvão e alguns gases não condensáveis.

É possível de forma genérica representar a reação que ocorre no processo pirolítico pela Equação 1 (BASU, 2010):

$$C_nH_mO_p + Heat \Rightarrow \sum_{líquido} C_aH_bO_c + \sum_{gas} C_xH_yO_z + \sum_{sólido} C \quad (1)$$

O foco principal dos processos de transformação térmica é gerar produtos com valor agregado e com alto potencial energético. Dessa a forma, a pirólise produz três produtos: o bio-óleo (líquido), o *biochar* (sólido) e o biogás (gasoso). 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.

As biomassas lignocelulósicas são aquelas que apresentam em sua composição básica cinco componentes, sendo quatro orgânicos (extrativos, lignina, hemicelulose e celulose) e um mineral (cinzas). Este tipo de biomassa tem sido uma alternativa à combustíveis fósseis por possuir uma estrutura complexa que pode gerar, dependendo do processo de conversão, produtos com valor agregado e potencial energético considerável (ZHOU et al., 2011).

O procedimento de uma revisão sistemática da literatura envolve identificar, avaliar e interpretar as pesquisas existentes sobre o assunto a ser estudado (Kitchenham, 2004). Estudos que contribuem para a revisão sistemática são chamados de estudos primários; já a revisão propriamente dita é considerada um derivativo desses estudos, chamada então, de estudo secundário. O procedimento adaptado por Kitchenham (2004) abrange três métodos de revisão existentes, muito usados no âmbito das pesquisas médicas, sendo eles: Manual do

revisor Cochrane, Diretrizes preparadas pelo Conselho Nacional de Saúde e Pesquisa Médica Australiano e Diretrizes do CRD para aqueles que realizam ou comissionam revisões. Atualmente, diversas áreas utilizam a revisão sistemática, pois a partir dela se identificam lacunas dos estudos existentes sobre um determinado assunto, de forma a realizar novos estudos primários.

METODOLOGIA

Para o procedimento da revisão sistemática foi utilizado o método adaptado por Biolchini et al. (2005) e Kitchenham (2004), o qual separa o processo de produção da revisão em três etapas:

1. Planejar/pensar no problema, encontrar os objetivos do estudo dentro dele e procurar materiais que estejam dentro do escopo desejado;
2. Filtrar os estudos encontrados e estabelecer critérios que determinem o quão próximo cada estudo está do seu trabalho;
3. Pegar os artigos selecionados nas etapas passadas e estabelecer uma relação entre eles para serem inseridos no texto dos resultados do trabalho.

Para essas três etapas, foi utilizado um *software* gratuito StArt, desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (LaPES), UFSCar (Universidade Federal de São Carlos). O uso deste *software* tem como objetivo sintetizar e organizar estas etapas, e, com isso, gerar material para a revisão sistemática.

Para iniciar a revisão sistemática foi realizada uma busca prévia sobre o tema deste trabalho em algumas bases de dados para definir os artigos-base. Estes artigos têm como principal objetivo identificar as palavras-chave que serão usadas para busca dos artigos da revisão sistemática. Esta etapa inicial é denominada de análise exploratória e antecede as etapas descritas no método apresentado.

Primeiramente foi realizada a etapa de planejamento, nela é necessário preencher o protocolo antes mesmo de ir a busca dos artigos que serão usados. O objetivo é parte fundamental e deve estar descrito de forma clara e concisa. Para este trabalho, como antes citado,

o objetivo é realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a pirólise de biomassas lignocelulósicas, avaliando o efeito das características das biomassas e dos parâmetros operacionais do processo na composição dos produtos gerados.

A partir deste objetivo, é necessário formular uma pergunta que identifique o que será buscado nos artigos. Para esta revisão, a questão levantada foi: Como as características das biomassas e os parâmetros de processo afetam o rendimento e a composição dos produtos gerados por pirólise?

Para a finalização do preenchimento do protocolo e consequentemente da primeira etapa da revisão sistemática, é necessário descrever quais são as bases de dados usadas para a pesquisa, e, para o caso desta revisão, utilizou-se o *Science Direct*. Outro fator importante é apresentar os critérios que gerarão a exclusão dos artigos. Os principais critérios estabelecidos dentro do *software* para a exclusão foram: biomassas não-lignocelulósicas, processos de co-pirólise, pirólise catalisada, pirólise fotocatalisada, pirólise com micro-ondas, artigos que não possuíam o foco no processo pirolítico, processos com biomassas pré-tratadas e foco na geração de adsorventes. Contudo, na seleção dos artigos na base de dados foi realizada mais uma restrição, a qual se refere a data de publicação, sendo que artigos anteriores a 2010 não foram considerados.

Para a etapa dois, etapa de seleção, foram reunidos os artigos da base de dados e foi realizado o tratamento destes seguindo os métodos de exclusão estabelecidos anteriormente. Durante a seleção, foi feita a extração de alguns dados para realizar um outro tipo de classificação destes artigos. Os critérios avaliados foram: biomassa usada no estudo, parâmetros avaliados, tipo de atmosfera de reação e tipo de reator. A partir da quantidade de parâmetros avaliados pelo artigo, aumentou-se a sua importância, gerando a seguinte classificação: muito baixo, baixo, alto e muito alto.

Para a última etapa, a etapa de sumarização, foi feito mais um processo de exclusão de artigos, nos quais, artigos avaliados como muito baixo e baixo no processo de extração foram desconsiderados.

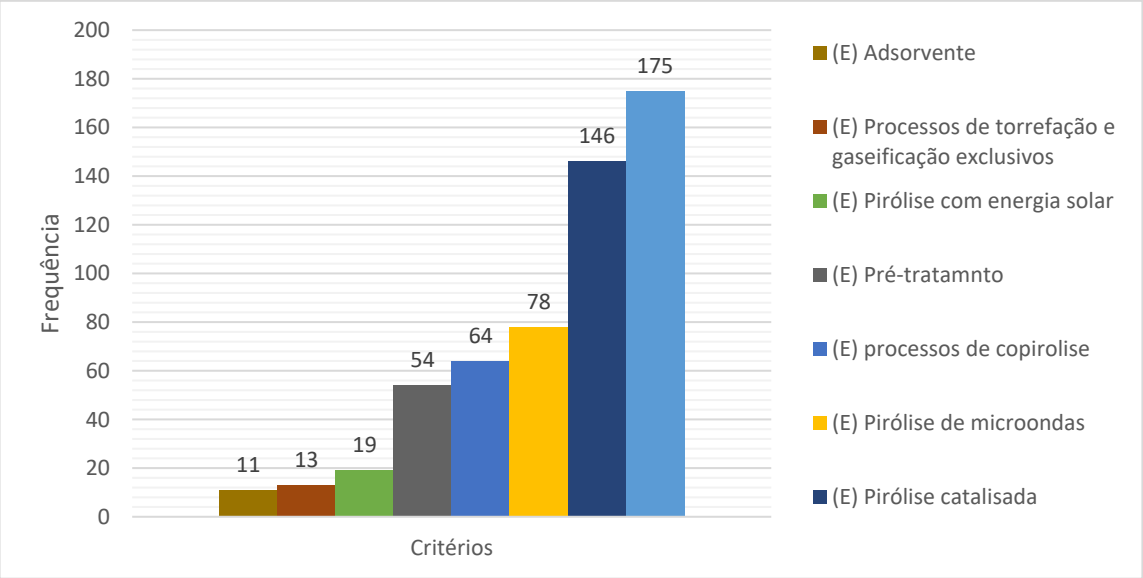
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a análise exploratória obteve-se quatro artigos-base: *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 destes artigos foi obtida a seguinte *string* que contém as palavras-chaves: *pyrolysis AND (bio-oil OR liquid) AND gas AND (biochar OR solid) AND yield*. Foi feita uma escolha mais ampla das palavras, pois notou-se que com o aumento das restrições ocorreu uma perda de alguns artigos que poderiam ser importantes para o conteúdo da revisão. Por este motivo, não foi especificado o tipo da biomassa.

Inicialmente, a partir da *string* obtida anteriormente, foram exportados para o *software* 542 artigos. Destes, durante a etapa de seleção, foram descartados 405 artigos pela leitura do título e do resumo, nos quais apresentavam algum critério de exclusão descrito no planejamento, restando 137 artigos. A partir disto foi possível construir o Gráfico 1 que representa os critérios que mais geraram exclusões no processo de seleção.

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



Fonte: Autoria própria (2023)

A partir do Gráfico 1 foi possível observar que o uso de biomassa que não tem origem lignocelulósica foi o principal motivo de exclusão de artigos na etapa de seleção. É importante notar que, poderia ter sido usada uma palavra-chave que descrevesse o tipo de biomassa, porém, na leitura dos resumos e dos títulos, observou-se que poucos artigos traziam as palavras 'biomassa lignocelulósica'; a maioria só descrevia o nome específico (como madeira de eucalipto, *Parthenium hysterophorus,* resíduo de café*, Prosopis Juliflora,* etc.).

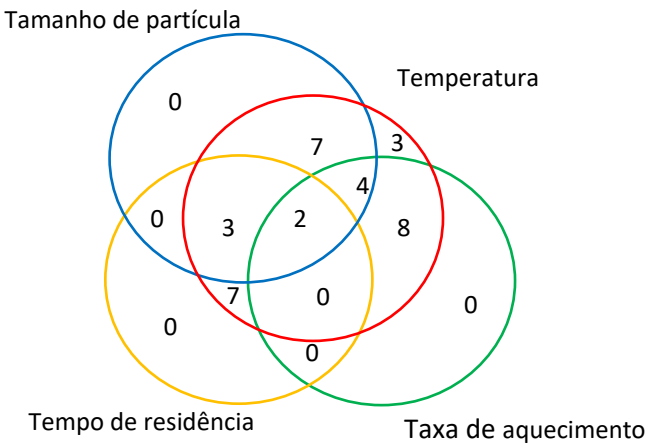
As pirólises catalisadas e com uso de micro-ondas apresentaram o segundo e terceiro lugar, respectivamente, em número de rejeição. Esta informação demonstra para onde os estudos com pirólise estão caminhando, ou seja, os estudos mais recentes têm buscado novas formas de aquecimento dos reatores pirolíticos, ou ainda, o uso de algum tipo de catalisador (adicionado ou não ao processo – como contaminante da biomassa). A presença de catalisadores geralmente possui foco na melhoria do processo e geração de uma quantidade maior de produtos, que também possuam uma qualidade maior.

Processos que sofrem algum tipo de pré-tratamento ou ainda que utilizam mais de uma biomassa (co-pirólise) são outra aposta recente para melhorar a quantidade e qualidade dos produtos gerados. Nesta revisão, não foram levados em consideração estes fatores, pois teve-se como o foco o funcionamento do processo, a sua otimização no modo mais básico de operação, para que após o seu entendimento desse, seja possível analisar as melhores oportunidades de melhoria do processo.

Na etapa de extração, dos 137 artigos selecionados, apenas 36 foram usados para a revisão sistemática. Isso porque no processo de leitura dos artigos notou-se que alguns critérios de exclusão definidos não estavam explícitos no título e/ou no resumo do artigo. Além disso, artigos que avaliavam apenas um parâmetro ou que realizavam o processo da pirólise em apenas uma condição acabaram sendo descartados. Isto se justifica pois o foco deste trabalho é entender como os parâmetros e as características das biomassas interferem na transformação térmica, dessa forma, estudos que avaliam mais parâmetros são mais vantajosos e completos para esta revisão.

Em uma análise dos principais fatores que afetam a pirólise, foram obtidos como principais parâmetros o tamanho de partícula, a temperatura, a taxa de aquecimento e o tempo de residência. Além disso, a vazão de gás inerte também apareceu nos artigos em estudo. A partir destas informações, construiu-se um Diagrama de Veen (Figura 1) para entender, dos parâmetros citados, quais foram os mais estudados e quais as combinações entre eles foram mais encontradas.

Figura 1 – Diagrama de Veen dos parâmetros obtidos na revisão sistemática da literatura



Fonte: Autoria própria (2023)

A partir da Figura 1 é possível analisar que de todos os artigos usados para a revisão, 34 deles tinham informações sobre como a temperatura afetava o processo da pirólise. A temperatura desempenha um papel muito importante, pois a pirólise é um processo termoquímico que utiliza calor para degradar a biomassa lignocelulósica, então a partir da análise deste parâmetro, pode-se obter a temperatura ótima de trabalho que gere o maior rendimento de produto.

Seguindo a Figura 1, verifica-se que os outros três parâmetros analisados estão presentes quase que nas mesmas proporções. A variação do tamanho de partícula foi avaliada em 16 artigos, a variação da razão de aquecimento em 14 artigos, e, o tempo de residência foi avaliado em 12 artigos no total. É também possível notar no Diagrama de Veen quais são

as combinações que mais apareceram nos artigos. Combinações com somente dois parâmetros, incluindo temperatura, foram as que tiveram maior quantidade de artigos.

Para as combinações com três parâmetros, foram encontrados 4 artigos que avaliam o tamanho de partícula, a temperatura e a taxa de aquecimento. Também, foram encontrados 3 artigos que avaliam o tamanho de partícula, a temperatura e o tempo de residência. Já combinações dos quatro parâmetros teve-se um resultado de 2 artigos somente.

A partir destes dados levantados na Figura 1 é possível verificar que todos os parâmetros destacados como importantes para o processo da pirólise estão corretos. É possível dar um destaque a temperatura e taxa de aquecimento como mais avaliados juntamente. Isso pode ser entendido, pois uma temperatura ótima gera o maior rendimento de produto e a taxa de aquecimento pode servir como fator de escolha para qual produto se deseja obter em maior quantidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método utilizado para a revisão sistemática obteve bons resultados em relação ao objetivo proposto. O uso do *software* gerou agilidade no processo de sistematização desta revisão, pois foi possível fazer a exclusão e a seleção dos artigos de forma rápida e simples. Além disso, o número de artigos obtidos foi satisfatório em relação tanto a quantidade quanto a qualidade das informações presentes. Um indicativo desse fator foi a semelhança entre os 36 artigos encontrados.

Com a análise dos artigos levantados na revisão sistemática da literatura proposta foi possível entender que os parâmetros que mais afetam a transformação termoquímica de pirólise são a temperatura, a taxa de aquecimento, o tempo de residência e o tamanho de partícula. A temperatura foi o parâmetro mais analisado em todos os estudos primários considerados. Isso demonstra a sua importância na otimização do processo da pirólise, pois a partir deste parâmetroa é possível conhecer a etapa que possui melhor rendimento para cada biomassa e que um gasto de energia para elevação em temperaturas mais altas pode ser desnecessário.

Além disso, foi possível analisar que existe uma tendência crescente a partir do ano de 2010 na pesquisa em algumas alterações no processo pirolítico, como o uso de outras

fontes de aquecimento, como o microondas, o uso de catalisadores para aumentar o rendimento ou até mesmo o uso de pré-tratamentos na biomassa. Esses fatores podem ser a aposta para otimizar o processo para que a pirólise tenha um valor mais baixo de instalação e que possa ser levada para uma escala industrial de forma mais econômica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Fundação Araucária pela bolsa de fomento para a pesquisa de Iniciação Cientifica.

REFERÊNCIAS

BORÉL, L. D. M. S. *Estudo de aplicação da pirólise rápida em leito de jorro para valorização de resíduos agroindustriais*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 14 dez. 2018.

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.

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 University*, v. 33, n. 2004, p. 1-26, 2004.

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.

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.

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.