



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



VÍCTOR MITLETON HERRERA

**ANÁLISE TÉCNICA E DE VIABILIDADE DE UM PROCESSO DE
PIRÓLISE POR MICRO-ONDAS**

Uberlândia – MG

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**ANÁLISE TÉCNICA E DE VIABILIDADE DE UM PROCESSO DE
PIRÓLISE POR MICRO-ONDAS**

Autor: Víctor Mitleton Herrera

**Monografia apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia como parte dos requisitos necessários para
a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão
de Curso da graduação em Engenharia Química.**

**Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza
Barrozo**

Uberlândia – MG

2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Ana Cristina Mitleton Herrera e André Luís Herrera, por sempre me apoiarem e me ajudarem.

Ao meu orientador, o professor Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo, por confiar a mim um trabalho tão importante e ter ajudado a despertar em mim um interesse maior por processos de pirólise.

A meu tio Donizeti Aparecido Campis e à minha tia Patrícia Mitleton Campis por terem me ajudado a conseguir material para os experimentos.

Aos meus amigos, Rodrigo Carrilho da Cunha, Roberto Vargas Chaul, Luiz Felipe de Souza dos Santos, Ruan Arthur de Carvalho, Hugo Astun Lopes, Ana Luísa Gabriel Santos e Calton João Dinis.

Ao João Victor Delfino Silva, à Grazielle Emanuella de Souza dos Santos e ao Rafael Ramos Heilbuth por terem me ajudado com os equipamentos e experimentos.

Ao professor Dr. Rubens Gedraite por ter me dado a oportunidade de realizar um estágio interno.

Às professoras Dra. Larissa Nayhara Soares Santana Faleiros e Dra. Fabiana Regina Xavier Batista, por terem me dado a oportunidade de participar de uma iniciação científica.

Aos professores Dr. Eloízio Júlio Ribeiro, Dr. Danylo de Oliveira Silva, Dra. Marina Seixas Pereira, Dr. Cláudio Roberto Duarte, Dr. Douglas Roberto de Matos Pimentel, Dr. Edson Nossol, Dr. Fernando Rodrigo Rafaeli, Dr. Claudio Cardoso, Dra. Amanda Danuello Pivatto, Dra. Ana Carla Piantella e Dra. Patrícia Angélica Vieira por serem ótimos professores.

Ao Edmilson Ribeiro, à coordenadora do curso de engenharia química, Alice Medeiros de Lima.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE SÍMBOLOS	12
RESUMO.....	14
ABSTRACT	15
1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Origem da palavra jatobá e locais em que essa espécie de árvore é nativa	19
2.2 Importância econômica do jatobá	19
2.2.1 Importância econômica da madeira do jatobá.....	19
2.2.2 Importância das folhas do jatobá.....	20
2.2.3 Importância da casca do tronco do jatobá	20
2.2.4 Importância do fruto do jatobá	20
2.3 Pirólise e seus produtos.....	23
2.3.1 Carvão vegetal.....	23
2.3.1.1 Biochar	23
2.3.1.2 Hidrochar.....	24
2.3.1.3 Diferenças entre o hidrochar e o biochar	24
2.3.2 Bio-óleo.....	25
2.3.3 Gás de pirólise.....	26
2.4 Técnicas de pirólise	26
2.4.1 Pirólise tradicional.....	26
2.4.2 Pirólise assistida por energia solar	27
2.4.3 Pirólise assistida por plasma	28
2.4.4 Carbonização Hidrotérmica.....	30
2.4.5 Pirólise assistida por micro-ondas.....	30
2.4.6 Pirólise sob vácuo e atmosfera inerte	32
2.4.7 Hidropirólise.....	32

2.4.8 Micropirólise	33
2.5 Métodos de pirólise.....	34
2.5.1 Pirólise lenta.....	34
2.5.2 Pirólise rápida.....	35
2.5.3 Pirólise flash.....	36
2.5.4 Pirólise intermediária	36
2.5.5 Pirólise com aquecimento segmentado	36
2.6 Uso de catalisadores nos processos de pirólise.....	37
2.7 Exemplos de processos de pirólise de biomassa.....	40
2.7.1 Pirólise da casca do fruto do jatobá do cerrado (<i>Hymenaea stigonocarpa</i>).....	40
2.7.2 Pirólise da casca do tronco do jatobá do cerrado, caroço de pequi e casca do fruto de baru.....	40
2.7.3 Produção de gás de síntese a partir da pirólise da madeira assistida por micro-ondas.....	43
2.7.4 Pirólise catalítica <i>in-situ</i> de palha de milho, usando óxido de cálcio como catalisador.....	44
2.7.5 Pirólise catalítica de óleo de soja com o objetivo de produzir biocombustíveis utilizando pentóxido de nióbio (Nb_2O_5) e catalisadores baseados no pentóxido de nióbio.....	45
2.7.6 Pirólise de resíduos de cevada de cervejarias na presença e na ausência de catalisadores	46
2.7.7 Pirólise catalítica <i>ex-situ</i> de palha de arroz usando zeólitas ZSM-5, Al-MCM-41, Al-MSU-F e cinzas de cascas de arroz como catalisador	47
2.7.8 Pirólise <i>in-situ</i> de madeira de faia usando diferentes catalisadores	47
2.7.9 Pirólise <i>in-situ</i> de cascas de nozes usando hidróxido de potássio, carbonato de potássio e carbonato de lítio como catalisador.....	49
2.7.10 Pirólise <i>in-situ</i> de palha de soja usando hidróxido de potássio como catalisador...	50
3. MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1 Obtenção da casca do fruto de jatobá	53

3.2 Moagem da casca do jatobá	53
3.3 Peneiramento	53
3.4 Análise imediata da casca do fruto do jatobá.....	54
3.5 Determinação da composição elementar de C, H e O	56
3.6 Cálculo do poder calorífico superior e inferior da casca do fruto do jatobá.....	57
3.7 Classificação atômica através do uso do Diagrama de van Krevelen.....	58
3.8 Preparação dos catalisadores usados.....	59
3.8.1 Óxido de cálcio.....	59
3.8.2 Resíduo da mineração de fosfato	60
3.8.3 Zeólita 3A.....	61
3.8.4 Pentóxido de nióbio (Nb_2O_5).....	62
3.8.5 Hidróxido de potássio.....	62
3.9 Micropirólise associada à cromatografia gasosa	63
3.9.1 Micropirólise na ausência de catalisadores	63
3.9.2 Micropirólise na presença de catalisadores.....	63
3.10 Pirólise assistida por micro-ondas	64
3.11 MEV (microscopia eletrônica de varredura)	66
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1 Análise imediata da casca do fruto do jatobá	67
4.2 Determinação da composição elementar, cálculo do PCI e PCS e classificação atômica.....	68
4.3 Micropirólise associada à cromatografia gasosa	70
4.3.1 Micropirólise associada à cromatografia gasosa na ausência de catalisadores.....	70
4.3.2 Micropirólise associada à cromatografia gasosa na presença de catalisadores.....	71
4.4 Pirólise assistida por micro-ondas	74
4.5 MEV.....	76
5. CONCLUSÃO.....	79
6. SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS.....	81

7. REFERÊNCIAS.....	82
8. APÊNDICE.....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Um jatobá (<i>Hymenaea courbaril</i>) no Parque Ceret na cidade de São Paulo.....	19
Figura 2.2 – Madeira do jatobá (<i>Hymenaea courbaril</i>) em 3 diferentes formas.....	20
Figura 2.3 - Folhas de jatobá (<i>Hymenaea martiana</i> Hayne) com algumas flores presentes.....	20
Figura 2.4 - Casca do tronco do jatobá (<i>Hymenaea courbaril</i>).....	21
Figura 2.5 - Frutos maduros de jatobá-do-cerrado (<i>Hymenaea stigonocarpa</i>).....	22
Figura 2.6 - Polpa do jatobá-do-cerrado (<i>Hymenaea stigonocarpa</i>).....	22
Figura 2.7 - Sementes de jatobá-do-cerrado (<i>Hymenaea stigonocarpa</i>).....	22
Figura 2.8 - Biochar obtido a partir de resíduo florestal.....	24
Figura 2.9 - Hidrochar obtido a partir de restos de comida.....	24
Figura 2.10 - Bio-óleo obtido a partir da pirólise rápida de resíduo florestal.....	26
Figura 2.11 - Esquema de uma calha parabólica.....	27
Figura 2.12 - Esquema de um espelho parabólico.....	28
Figura 2.13 - Esquema de uma estação com um conjunto de helióstatos.....	28
Figura 2.14 - Tocha de plasma de nitrogênio.....	29
Figura 2.15 - Esquema de um processo de pirólise assistida por plasma.....	29
Figura 2.16 - Reator usado para carbonização hidrotérmica.....	30
Figura 2.17 - Esquema de um aparato de pirólise assistida por micro-ondas.....	31
Figura 2.18 - Corte de uma tora de madeira após ser irradiada por micro-ondas por 3 minutos.....	31
Figura 2.19 - Mecanismo de aquecimento por micro-ondas.....	32
Figura 2.20 - Esquema de um processo de hidropirólise.....	33
Figura 2.21 - Pirolisador acoplado a um cromatógrafo gasoso com espectrômetro de massa.....	34
Figura 2.22 - Fabricação de carvão vegetal a partir do processo de carbonização.....	35
Figura 2.23 - Esquema de um processo pirolítico assistido por micro-ondas <i>ex-situ</i>	39

Figura 2.24 - Esquema de um processo pirolítico <i>in-situ</i> assistido por micro-ondas.....	39
Figura 3.1 - Moinho de facas usado para moer a casca do fruto do jatobá.....	53
Figura 3.2 - Conjunto de peneiras e agitador montado.....	54
Figura 3.3 - Diagrama de van Krevelen.....	58
Figura 3.4 - Óxido de cálcio usado no experimento.....	60
Figura 3.5 - Resíduo de mineração de fosfato usado no experimento.....	61
Figura 3.6 - Zeólita 3A.....	61
Figura 3.7 - Zeólita 3A moída.....	61
Figura 3.8 - Pentóxido de nióbio utilizado.....	62
Figura 3.9 - Esquema de pesagem de um cadinho com biomassa sem catalisador.....	62
Figura 3.10 - Esquema de pesagem de um cadinho com biomassa com catalisador.....	64
Figura 3.11 - Unidade de pirólise assistida por micro-ondas "ArgileuMendes".....	65
Figura 4.1 - Classificação da casca do fruto do jatobá no diagrama de van Krevelen.....	70
Figura 4.2 - Resultados dos experimentos na ausência de catalisadores.....	71
Figura 4.3 - Resultados dos experimentos na presença de KOH.....	72
Figura 4.4 - Resultados dos experimentos na presença de CaO.....	72
Figura 4.5 - Resultados dos experimentos na presença de zeólita 3A.....	73
Figura 4.6 - Resultados dos experimentos na presença de resíduo de mineração de fosfato.....	74
Figura 4.7 - Resultados dos experimentos na presença de resíduo de Nb ₂ O ₅	74
Figura 4.8 - Superfície da biomassa observada com um aumento de 300 vezes.....	76
Figura 4.9 - Superfície da biomassa observada com um aumento de 2000 vezes.....	77
Figura 4.10 - Superfície da biomassa observada com um aumento de 300 vezes.....	77
Figura 4.11 - Superfície da biomassa observada com um aumento de 2000 vezes.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Eficiência de remoção de cada adsorvente para a cafeína e o paracetamol.....	40
Tabela 2.2 - Pirólise de partículas de casca do tronco do jatobá maiores que 40 mesh.....	41
Tabela 2.3 - Pirólise de partículas de caroço de pequi maiores do que 40 mesh.....	41
Tabela 2.4 - Pirólise de partículas de casca do fruto de baru maiores do que 40 mesh.....	41
Tabela 2.5 - Pirólise de partículas de casca da árvore do jatobá menores do que 60 mesh.....	42
Tabela 2.6 - Pirólise de partículas de caroço de pequi menores do que 60 mesh.....	42
Tabela 2.7 - Pirólise de partículas de casca do fruto de baru menores do que 60 mesh.....	42
Tabela 2.8 - Propriedade de alguns dos bio-óleos obtidos.....	43
Tabela 2.9 - Resultados dos experimentos que compararam as proporções de catalisador.....	45
Tabela 2.10 - Resultados dos experimentos que compararam diferentes tipos de catalisador....	50
Tabela 2.11 - Resultados dos experimentos que compararam diferentes proporções de KOH...	51
Tabela 2.12 - Resultados dos experimentos feitos na ausência de catalisador.....	51
Tabela 2.13 - Resultados dos ensaios feitos a diferentes temperaturas na presença de KOH.....	52
Tabela 2.14 - Qualidade do carvão gerado a 600 °C a diferentes proporções de catalisadores...	52
Tabela 2.15 - Composição mássica do bio-óleo produzido na ausência e na presença de KOH.	52
Tabela 4.1 - Análise imediata.....	68
Tabela 4.2 - Composição elementar encontrada pelo método de Shen.....	68
Tabela 4.3 - Composição elementar encontrada pelo método de Parikh.....	69
Tabela 4.4 - Composição elementar encontrada pelo método de Nhuchhen.....	69
Tabela 4.5 - Composição elementar encontrada pela média da composição dos três métodos...	70
Tabela 4.6 - Condições e resultados de cada experimento.....	75
Tabela 8.1 - Resultado dos testes de micropirólise feitos na ausência de catalisadores.....	94
Tabela 8.2 - Resultados dos experimentos de micropirólise na presença de KOH	94

Tabela 8.3 - Resultados dos experimentos de micropirólise na presença de CaO.....	94
Tabela 8.4 - Resultados dos experimentos de micropirólise na presença de zeólita 3A.....	95
Tabela 8.5 - Resultados dos experimentos de micropirólise na presença de resíduo de mineração de fosfato.....	95
Tabela 8.6 - Resultados dos experimentos de micropirólise na presença de Nb ₂ O ₅	95

LISTA DE SÍMBOLOS

$U(\%)$ representa o teor de umidade da biomassa em %

$B(\%)$ representa o teor de umidade da biomassa em %

m_{ci} representa a massa inicial do cadinho e da amostra de biomassa em conjunto em g

m_{cs} representa a massa do cadinho e da amostra em conjunto em g após o teste de umidade

m_c representa a massa do cadinho em g

m_b representa a massa da biomassa em g

$m_p(\%)$ representa a massa perdida após o teste de umidade e voláteis em %

$A(\%)$ representa a massa perdida após o teste de umidade e voláteis em %

m_v representa a massa do cadinho e da amostra em g após o teste de voláteis

$V_{BU}(\%)$ representa o teor de voláteis em base úmida em %

$V_{BS}(\%)$ representa o teor de voláteis em base seca em %

$C_{iBU}(\%)$ representa o teor de cinzas em base úmida em %

m_{cc} representa a massa do cadinho após o teste de cinzas em g

$C_{iBS}(\%)$ representa o teor de cinzas em base seca em %

$C_F(\%)$ representa o teor de carbono fixo em base seca em %

PCS representa o poder calorífico superior

MJ representa a unidade de energia em megajoules

kcal representa a unidade de energia em quilocalorias.

kg representa a unidade de massa em quilograma

CaCO_3 é a fórmula química do carbonato de cálcio (calcário)

CaO é a fórmula química do óxido de cálcio

Ca(OH)_2 é a fórmula química do hidróxido de cálcio

CO_2 é a fórmula química do dióxido de carbono

KOH é a fórmula química do hidróxido de potássio

Nb₂O₅ é a fórmula química do pentóxido de nióbio

C(%) fração mássica de carbono

H(%) fração mássica de hidrogênio

O(%) fração mássica de oxigênio

N(%) fração mássica de nitrogênio

S(%) fração mássica de enxofre

RESUMO

Esse trabalho investigou o processo de pirólise da casca do fruto do jatobá. Primeiramente, foi feita a análise imediata da casca do fruto do jatobá. A partir da análise imediata, foram determinados os teores de umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo. A partir desses valores, foi feita a determinação da composição elementar da casca do fruto do jatobá usando as metodologias de Parikh, de Shen e de Nhuchhen, além da média aritmética das três metodologias. E, a partir da composição elementar e da caracterização da casca do fruto do jatobá, foi feita a classificação atômica da casca do fruto do jatobá e, usando o diagrama de van Krevelen, foi calculada a razão atômica. O teor de umidade foi de $8,67 \% \pm 0,09 \%$, o teor de cinzas foi de $1,52 \% \pm 0,01 \%$ em base seca, o teor de voláteis foi de $80,71 \% \pm 2,63 \%$ em base seca e a fração de carbono fixo foi de $17,77 \% \pm 2,63 \%$. A partir da média das três metodologias, foi possível determinar que o teor de carbono foi de $48,27 \% \pm 0,46 \%$, o teor de hidrogênio foi de $5,91 \% \pm 0,01 \%$ e o teor de oxigênio foi de $43,86 \% \pm 0,34 \%$. A partir dos ensaios de micropirólise, foi possível perceber que os catalisadores alcalinos, como hidróxido de potássio e óxido de cálcio, foram os que apresentaram os melhores resultados, visto que esses catalisadores favoreceram a formação de hidrocarbonetos e isso foi perceptível através do alto teor de hidrocarbonetos nos voláteis. Nos ensaios feitos com o óxido de cálcio como catalisador a $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, o teor de hidrocarbonetos nos voláteis foi de $15,0 \%$ e, nos ensaios feitos a $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ usando hidróxido de potássio como catalisador, o teor de hidrocarbonetos nos voláteis foi de $17,1 \%$. Também foi possível perceber que, na ausência de catalisadores, temperaturas mais altas favorecem a formação de hidrocarbonetos. Os experimentos envolvendo pirólise assistida por micro-ondas foram feitos usando partículas com diâmetro entre $0,250\text{ mm}$ e $0,355\text{ mm}$ e com partículas com diâmetro entre $0,106\text{ mm}$ e $0,180\text{ mm}$. As partículas maiores favoreceram a formação de carvão, enquanto as partículas menores favoreceram a formação de bio-óleo. Experimentos com longas durações e temperaturas entre $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ favorecem a formação de bio-óleo. Enquanto temperaturas entre $451\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ favorecem a formação de carvão. A partir das imagens obtidas usando microscopia eletrônica de varredura, foi possível visualizar que o carvão vegetal é bem mais poroso e possui uma superfície mais irregular do que a biomassa original, sendo possível afirmar que a área superficial é maior quando comparada à biomassa de origem.

Palavras-chave: jatobá, bio-óleo, carvão, catalisadores, pirólise assistida por micro-ondas, micropirólise

ABSTRACT

This study investigated the pyrolysis processes of the jatobá fruit peel. First was made the proximate analysis of biomass; from the proximate analysis results, the moisture, ash, volatile matter, and fixed carbon content were determined. From these values, the elemental composition of the jatobá fruit peel was determined using the Parikh, Shen, and Nhuchhen methodologies, in addition to the arithmetic mean of the three methodologies. From the elemental composition and characterization of the jatobá fruit peel, the atomic classification of the jatobá fruit peel was performed, and the atomic ratio was calculated using the van Krevelen diagram. The moisture content was $8.67\% \pm 0.09\%$, the ash content was $1.52\% \pm 0.01\%$ on a dry basis, the volatile content was $80.71\% \pm 2.63\%$ on a dry basis, and the fixed carbon fraction was $17.77\% \pm 2.63\%$. From the average of the three methodologies, it was possible to determine that the carbon content was $48.27\% \pm 0.46\%$, the hydrogen content was $5.91\% \pm 0.01\%$, and the oxygen content was $43.86\% \pm 0.34\%$. From the micropyrolysis tests, it was observed that alkaline catalysts such as potassium hydroxide and calcium oxide presented the best results, since these compounds favored the formation of hydrocarbons, which was explained by the high hydrocarbon content in the volatiles. Tests conducted with calcium oxide at $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ showed a hydrocarbon content in the volatiles of 15.0%, while tests conducted at $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ using potassium hydroxide showed a hydrocarbon content in the volatiles of 17.1%. It was also observed that the absence of higher temperatures favors hydrocarbon formation. Experiments involving microwave-assisted pyrolysis were performed using particles with diameters between 0.250 mm and 0.355 mm and particles with diameters between 0.106 mm and 0.180 mm; larger particles favored charcoal formation, while smaller particles favored bio-oil formation. Long duration experiments and temperatures between $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ are favorable to produce bio-oil. While temperatures between $451\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ are favorable for producing charcoal. Scanning electron microscopy images showed that the charcoal is much more porous and has a more irregular surface than the original biomass, indicating a larger surface area compared to the original biomass.

Keywords: jatobá, bio-oil, charcoal, catalyzers, microwave-assisted pyrolysis, micropyrolysis

1. INTRODUÇÃO

A busca por fontes renováveis de energia e por substitutos para recursos não renováveis se tornou uma necessidade nos dias de hoje devido principalmente ao aquecimento global e outros possíveis impactos ambientais provenientes da extração desses recursos não renováveis, como por exemplo combustíveis fósseis como carvão mineral, petróleo e gás natural. Combustíveis não renováveis, como o carvão mineral, derivados do petróleo e o gás natural, contribuem significativamente para o aquecimento global, visto que liberam grandes quantidades de CO₂ quando são queimados. (EPA, 2025).

Ainda assim, nos dias de hoje, existe uma enorme dependência de combustíveis derivados de petróleo, como gasolina, óleo diesel, querosene de aviação e óleo combustível. Além disso, em 2022, 80,9 % da energia produzida no mundo foi gerada a partir de combustíveis não renováveis, sendo 27,6 % a partir do carvão, 30,2 % a partir de combustíveis provenientes do petróleo e 23,1 % proveniente do gás natural (IEA, 2025).

Resolver esse problema de dependência é de suma importância, visto que a temperatura média do planeta subiu 1,1 °C desde 1850. Caso não ocorresse a interferência humana no clima, era para a temperatura média do planeta estar diminuindo lentamente, não aumentando, pois essa era a tendência antes da revolução industrial. Há evidências de que, em um período que iniciou há 6500 anos atrás e foi até o ano de 1800, a temperatura média do planeta baixou menos de 1 °C. Em outras palavras, a mudança climática causada pela humanidade em pouco mais de dois séculos foi mais impactante do que a mudança climática natural que vinha ocorrendo. A partir disso, é possível concluir que o problema não está no fato de estar ocorrendo mudança climática, mas sim na velocidade, na intensidade e no sentido em que a mudança climática está ocorrendo, e isso é culpa da humanidade (BBC, 2025; The Arizona University, 2025).

Por causa do aquecimento global, diversas reuniões sobre o tema foram feitas, como por exemplo, a conferência de Estocolmo de 1972 realizada pela ONU (UNITED NATIONS, 2025). Outras reuniões que também valem a pena ser mencionadas são a Cúpula da Terra, também realizada pela ONU em 1992 na cidade do Rio de Janeiro (UNITED NATIONS, 2025). E o Acordo de Paris, que estabeleceu como objetivo “manter o aumento da temperatura média global para bem abaixo de 2 °C” e buscar esforços “para limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais” (UNFCCC, 2015).

Outra indústria que gera grande impacto ambiental e tem uma forte ligação com o setor petroquímico é a indústria de fertilizantes. Pois existem fertilizantes que são à base de nitrogênio, que são produzidos a partir de insumos produzidos a partir do carvão e do gás natural, como por exemplo, fertilizantes à base de amônia e o ácido nítrico, que é usado em larga escala na fabricação desses fertilizantes. Isso ocorre pois, para se produzir amônia via processo de Haber-Bosch, é necessário hidrogênio, que é produzido em sua maioria a partir do carvão e do gás natural, e a amônia é usada para produzir o ácido nítrico através do processo Ostwald (APPL, 2006; OSTWALD, 1902; Schultz; Soares, 2014).

Além disso, outros fertilizantes precisam ser extraídos pelo processo de mineração, como por exemplo, os fertilizantes à base de fósforo, que são produzidos a partir da rocha fosfática. Esses fertilizantes contêm contaminantes como o cádmio (Cd), pois a rocha fosfática contém mais cádmio do que o solo. Esses fertilizantes podem conter também flúor (F), que está presente em alguns compostos da rocha fosfática, como por exemplo o $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ (Chaney, 2012; Dana; Hurlbut, 1944).

Um processo que pode ser utilizado para produzir combustíveis renováveis, fertilizantes e outros produtos é o processo de pirólise de biomassas. Com o processo de pirólise de biomassas, que não tenham como origem o desmatamento, é possível produzir carvão vegetal, bio-óleo e gás de pirólise. A partir desse processo é possível também obter outros produtos como carvão ativado, que pode ser usado como adsorvente, fertilizantes que contenham fósforo, potássio, nitrogênio, dentre outros nutrientes e outros combustíveis como componentes para formulação da gasolina e combustível marítimo, aditivos para a gasolina e o diesel, um gás similar ao GLP, gás combustível e um gás que pode ser usado como substituto para o gás de síntese produzido a partir do carvão mineral e do gás natural (Almeida, 2008; EBC, 2025; Petrobrás, 2022, 2025).

Existem vários métodos de se realizar o processo de pirólise, como por exemplo a pirólise tradicional, a pirólise assistida por energia solar, a pirólise a plasma, a pirólise assistida por micro-ondas e a carbonização hidrotérmica, cada método com suas vantagens e desvantagens. Vale ressaltar que muitos dos métodos de pirólise podem ser feitos sob vácuo e/ou atmosfera inerte. Além disso, o processo de pirólise pode ser feito com auxílio de catalisadores, que servem para aumentar a qualidade do bio-óleo. A pirólise tradicional utiliza métodos de aquecimento tradicionais, como resistores elétricos e combustíveis, é um método usado em grande escala para produzir o carvão vegetal utilizado em churrasqueiras e fornos de

pizzaria. (Pahnila et al., 2023a, 2023; Sharma et al., 2023; UFSM, 2024; Yoganandham; Sathyamoorthy; Renuka, 2020).

Uma árvore que é nativa de toda a América do Sul, da América Central, do leste da África, da ilha de Madagascar e das Ilhas Mascarenhas é o jatobá, que é uma árvore que possui diversas aplicações, como por exemplo, fabricação de canoas, de antibactericidas, de móveis, acabamentos externos dentre outras aplicações como por exemplo, um extrato hidroacetônico, que tem propriedades antimicrobianas. O seu fruto possui uma casca lignocelulósica dura, que garante propriedades interessantes para a realização de sua pirólise. A partir de sua pirólise, é possível produzir biochar e hidrochar que podem ser úteis na fabricação de carvão ativado que serve para remover poluentes emergentes como paracetamol e cafeína de efluentes. Além disso, o processo de pirólise da casca do fruto do jatobá pode produzir bio-óleo (Costa; Souza; Souza, 2011; Santana, 2015; SEMIL-SP, 2016).

Com isso, o objetivo geral desse estudo é avaliar a produção de carvão e bio-óleo através da pirólise da casca do fruto do jatobá.

E os objetivos específicos são:

- Realizar a micropirólise da casca do fruto do jatobá na ausência de catalisadores.
- Realizar a micropirólise da casca do fruto do jatobá usando óxido de cálcio, resíduo de mineração de fosfato, zeólita 3A, pentóxido de nióbio e hidróxido de potássio como catalisadores *ex-situ*.
- Realizar a pirólise assistida por micro-ondas da casca do fruto do jatobá.
- Analisar a superfície do carvão produzido usando microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Origem da palavra jatobá e locais em que essa espécie de árvore é nativa

A palavra jatobá se refere às árvores das espécies *Hymenaea sp.* que são nativas da América do Sul, América Central, leste da África, Madagascar e Ilha Mascarenhas. Seu nome é de origem tupi e significa “fruto de casca dura” (Costa et al., 2011; SEMIL-SP, 2025). A Figura 2.1 é uma foto de uma árvore de jatobá plantada no Parque Ceret, na cidade de São Paulo.

Figura 2.1 - Um jatobá (*Hymenaea courbaril*) no Parque Ceret na cidade de São Paulo



Fonte: SEMIL-SP, 2025

2.2 Importância econômica do jatobá

2.2.1 Importância econômica da madeira do jatobá

Essa árvore possui uma grande importância econômica, pois sua madeira é muito pesada, possui um cerne que varia de vermelho a marrom-claro, apresenta, às vezes, manchas escuras, grã irregular, textura média, possui um bom acabamento e seu cheiro é imperceptível. A madeira do jatobá é utilizada para fabricação de móveis e construções externas, e no período pré-colonial os indígenas ou povos nativos a usavam para a construção de canoas (Costa et al., 2011). A Figura 2.2 mostra como é a madeira do jatobá em 3 diferentes formas.

Figura 2.2 - Madeira do jatobá (*Hymenaea courbaril*) em 3 diferentes formas

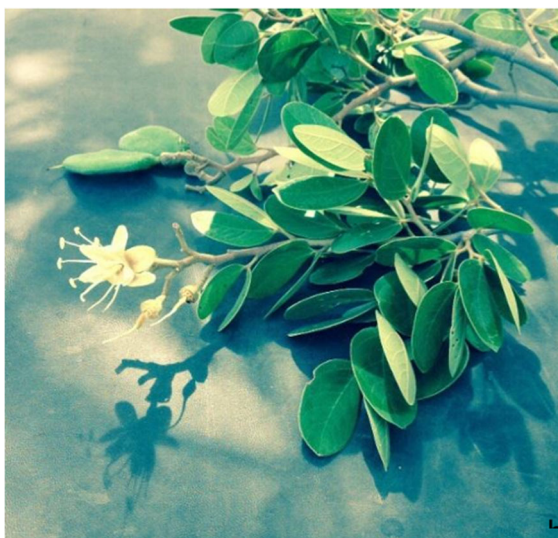


Fonte: Ferreira, 2020

2.2.2 Importância das folhas do jatobá

O extrato hidroacetônico das folhas de uma espécie de jatobá (*Hymenaea martiana*) é rico em flavonoides como canferol, quercetina, quercitrina e rutina e apresenta atividade antimicrobiana frente às bactérias patogênicas como *S. aureus*, *E. coli* e *Salmonella spp.*, possuindo um enorme potencial de utilização como alternativa medicinal de baixo custo para redução de patógenos humanos. Para obter esse extrato, primeiramente é feita a coleta das folhas e logo em seguida essas folhas são secas e trituradas e, por fim, são submetidas à extração com etanol 3 vezes por 72 horas a 25 °C (Santana 2015). As folhas de jatobá com algumas flores presentes podem ser vistas na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Folhas de jatobá (*Hymenaea martiana* Hayne) com algumas flores presentes



Fonte: Santana, 2015

2.2.3 Importância da casca do tronco do jatobá

A casca do tronco do jatobá é utilizada na medicina popular no tratamento de doenças como gripe, cistite, bronquite, infecções da bexiga e como vermífugo. Da casca também é

extraída uma resina que pode ser usada como verniz vegetal, combustível, incenso, polimento e impermeabilizador. Esse detalhe do tronco é possível ser visto na Figura 2.4 (Costa et al., 2011).

Figura 2.4 - Casca do tronco do jatobá (*Hymenaea courbaril*)



Fonte: Costa; Souza; Souza, 2011

2.2.4 Importância do fruto do jatobá

O fruto do jatobá é uma vagem lenhosa, indeiscente, possui uma cor marrom brilhante, sua casca é dura, sua polpa é carnosa, farinácea e possui um odor característico adocicado e comestível (Carvalho, 2003; Costa et al., 2011). A polpa do jatobá serve para fazer farinha e serve também como alimento para outros animais (Costa et al., 2011). A casca do fruto é lenhosa, portanto, sua estrutura é lignocelulósica, portanto, na sua composição contém lignina, celulose e hemicelulose. Além disso, a casca do jatobá contém taninos (Souza et al., 2017).

A casca do jatobá possui na sua composição 21,56 % de celulose, 16,1 % de hemicelulose, 16,02 % de hemicelulose, 49,26 % de lignina, 10,09 % de extrativos (que são ceras, gorduras, resinas, taninos, açúcares, amidos, pigmentos etc.) e 2,23 % de cinzas (Cardoso, 2020). Frutos maduros de jatobá podem ser vistos na Figura 2.5, a polpa do fruto pode ser vista na Figura 2.6 e suas sementes podem ser observadas na Figura 2.7.

Figura 2.5 - Frutos maduros de jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa*)



Fonte: Sano; Agostini-Costa; Faria, 2016

Figura 2.6 - Polpa do jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa*)



Fonte: Cipriano et al., 2014

Figura 2.7 - Sementes de jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa*)



Fonte: Carvalho, 2006

2.3 Pirólise e seus produtos

A palavra pirólise tem como origem o grego e significa separação pelo fogo (pyro, “fogo,” e lysis, “separação”). A pirólise consiste em um processo em que um material é decomposto a altas temperaturas e na ausência de oxigênio. A pirólise pode produzir tanto uma fração sólida, quanto uma fração líquida e uma fração gasosa. Esse processo é utilizado na produção de carvão vegetal (biochar e hidrochar, que são tipos de carvão vegetal), bio-óleo e gases de pirólise que são uma mistura de CO, CO₂, H₂ e CH₄. (Cardoso, 2020; Rahimpour; Nategh, 2016).

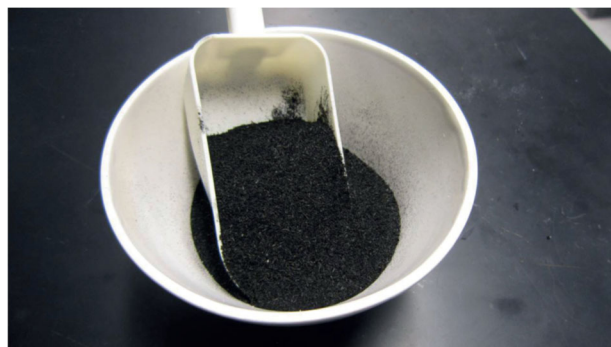
2.3.1 Carvão vegetal

O carvão vegetal é um produto amplamente utilizado tanto em indústrias, no dia a dia e até mesmo na arte. Sendo assim, o principal produto produzido a partir da pirólise, o carvão vegetal, é um combustível renovável, se obtido a partir de madeira de reflorestamento, pois caso a biomassa utilizada seja fruto de desmatamento, haverá uma enorme contribuição para o efeito estufa e perda de áreas florestais. Dentre os usos do carvão vegetal estão: o aquecimento de churrasqueiras e fornos de pizzarias, produção de ferro-gusa, ligas ferrosas e silício elementar (conhecido popularmente como “silício metálico”) e fabricação de lápis com o interior de carvão vegetal ao invés de grafite, além de poder ser utilizado como fertilizante. O carvão vegetal é produzido principalmente utilizando biomassas abundantes e baratas, como por exemplo, madeira de eucalipto ou de pinus ou o endocarpo do coco (Andrade et al., 2004; Brito, 1984; Harris, 1999; Ndoung; Figueiredo; Ramos, 2021; Ray, 1979; RIMA, 2025a, 2025b; Santos; Hatakeyama, 2013; UFMS, 2025).

2.3.1.1 Biochar

O biochar é um material rico em carbono, muito poroso, que possui uma grande área superficial e boa condutividade elétrica. O biochar é produzido a partir da pirólise de biomassa de resíduos agrícolas e florestais. Dentre suas utilidades estão: a fabricação de células combustíveis e baterias, além de ser útil na fabricação de carvão ativado para remoção de poluentes orgânicos emergentes de efluentes domésticos como azul de metileno, cafeína e paracetamol. O biochar pode também ser utilizado como fertilizante e na produção de pasta de combustível, que é um combustível muito semelhante à pasta de carvão mineral, porém com a vantagem de ser renovável. Uma amostra de biochar pode ser observada na Figura 2.8 (Cardoso, 2020; Khedulkar et al., 2024; Liu et al., 2017; Zepeda et al., 2023).

Figura 2.8 - Biochar obtido a partir de resíduo florestal



Fonte: Pighinelli et al., 2018

2.3.1.2 Hidrochar

O hidrochar é obtido quando a biomassa é introduzida em uma autoclave e logo em seguida é aquecida a temperaturas entre 150 °C e 260 °C. Durante esse processo, a biomassa participa de uma série de reações químicas que são: estruturação, decomposição (que se inicia com a hidrólise), depois ocorrem reações de desfuncionalização, dentre elas a desidratação e descarboxilação e por fim a recondensação e a aromatização, ocorrendo assim a formação do hidrochar. Assim como o biochar, o hidrochar também possui uma elevada área superficial. E assim como o biochar pode ser útil na adsorção de poluentes como azul de metileno, paracetamol e cafeína. Uma amostra de hidrochar pode ser vista na Figura 2.9 (Antero et al., 2019; Cardoso, 2020; Miranda, 2017).

Figura 2.9 - Hidrochar obtido a partir de restos de comida



Fonte: Kantakanit et al., 2018

2.3.1.3 Diferenças entre o hidrochar e o biochar

O hidrochar possui um menor teor de cinzas comparado ao biochar, pois durante o seu processo de fabricação elas se dissolvem na água da autoclave, enquanto no biochar as cinzas

ficam retidas na biomassa. O biochar possui um maior teor de carbono, pois durante a pirólise ocorre maior desidratação da biomassa. O biochar apresenta uma área superficial maior do que o hidrochar, pois durante o seu processo de fabricação há a presença de um fluxo de gás e sua fabricação ocorre a temperaturas superiores à da fabricação de hidrochar. Essas características tornam os dois tipos de carvão vegetal interessantes para diferentes aplicações. Por exemplo, apesar de o hidrochar ter uma menor área superficial do que o biochar, o menor teor de cinzas o torna um precursor melhor para a obtenção do carvão ativado, enquanto o biochar é melhor para ser usado como fertilizante, visto que as cinzas permanecem no carvão (Cardoso, 2020; Khedulkar et al., 2024; Masoumi et al., 2021).

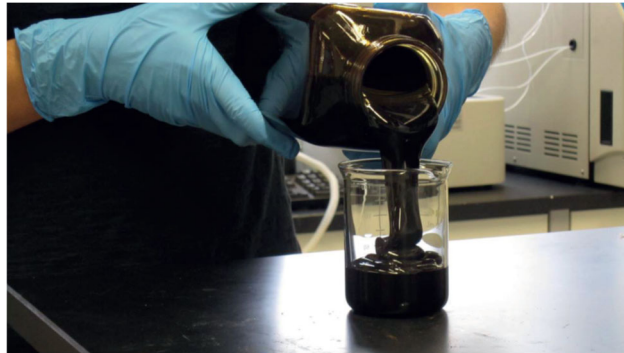
2.3.2 Bio-óleo

O bio-óleo, chamado também de óleo de pirólise, bio-óleo bruto, alcatrão pirolítico, alcatrão pirolenhoso, licor pirolenhoso, líquido de madeira, óleo de madeira, condensado da fumaça, destilado da madeira. É um líquido que a coloração varia de marrom escuro a preto, porém ele pode possuir outras cores como vermelho ou verde dependendo da biomassa utilizada no processo pirolítico, possui uma alta viscosidade, e seu odor lembra lenha queimada com molho de churrasco. O bio-óleo possui um elevado nível de compostos oxigenados como ácidos, açúcares, álcoois, aldeídos, cetonas, ésteres, furanos, fenóis, oxigenados mistos, guaiacóis, seringóis. Essa mistura tem como origem a despolimerização e a fragmentação da celulose, da lignina e da hemicelulose. A alta viscosidade do bio-óleo pode ser vista na Figura 2.10 (Almeida, 2008; Pecha; Garcia-Perez, 2015).

A qualidade do bio-óleo pode ser melhorada através do uso de catalisadores, essa qualidade tem a ver com a fração de hidrocarbonetos presentes no bio-óleo e com a acidez do bio-óleo. Quanto maior for a fração de hidrocarbonetos e menor for a acidez, melhor será a qualidade do bio-óleo, porém outros parâmetros podem ser considerados para avaliar a qualidade do bio-óleo (Oliveira, 2015; Rajmohan et al., 2020).

O bio-óleo possui diversas aplicações, como por exemplo, a produção de combustíveis como um gás similar ao GLP (gás liquefeito de petróleo), gasolina, aditivos para o diesel e o biodiesel, combustível marítimo, óleo combustível para indústrias e hidrogênio (Agência Gov, 2025; Almeida, 2008; Czernik; Evans; French, 2007; G1, 2025; PEREIRA, 2023; Petrobrás, 2022; UGA, 2007).

Figura 2.10 - Bio-óleo obtido a partir da pirólise rápida de resíduo florestal



Fonte: Pighinelli et al., 2018

2.3.3 Gás de pirólise

O gás de pirólise é uma mistura de vários gases como CO, CO₂, H₂ e CH₄, que pode ser usado como combustível e pode ser útil na síntese de diversos produtos como metanol, hidrocarbonetos via síntese de Fischer–Tropsch, e amônia via síntese de Haber-Bosch e consequentemente ácido nítrico e nitratos via processo de Ostwald, ou seja, é um bom substituto para o gás de síntese obtido a partir do gás natural (APPL, 2006; Evans; Smith, 2012; OSTWALD, 1902; Schultz; Soares, 2014).

2.4 Técnicas de pirólise

2.4.1 Pirólise tradicional

A pirólise tradicional utiliza combustíveis ou resistores elétricos para aquecer a biomassa ou qualquer outro material que se deseja fazer a pirólise. Esse método é utilizado em grande escala para produzir carvão vegetal que é utilizado em churrasqueiras e fornos de pizzeria. Para produzi-lo, pode-se utilizar madeira de eucalipto, madeira de pinus ou casca de coco, porém é possível utilizar outras biomassas de fontes renováveis. Porém, um grande problema que ocorre não só no Brasil, mas também no mundo inteiro, é a utilização de biomassa que tem como origem o desmatamento para a produção do carvão vegetal, o que faz com que o carvão deixe de ser um combustível que tenha origem renovável. A pirólise de materiais utilizando esse método pode ser feita utilizando vácuo e/ou utilizando uma atmosfera inerte com gases como nitrogênio ou argônio (Andrade et al., 2004; Brito, 1984; Pahnla et al., 2023; Ray, 1979; UFMS, 2025).

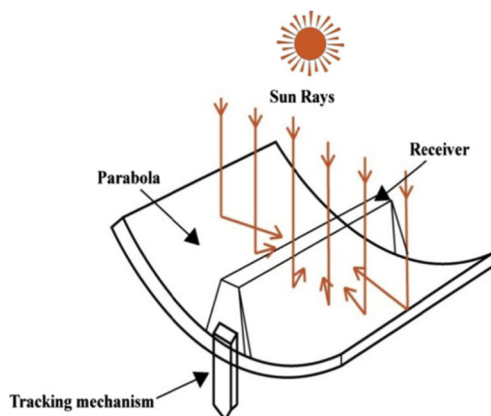
2.4.2 Pirólise assistida por energia solar

A pirólise assistida por energia solar é muito similar a pirólise tradicional, porém em vez de usar combustíveis ou resistores elétricos para realizar o aquecimento, o aquecimento é feito utilizando espelhos parabólicos, lentes convexas, lentes de Fresnel, ou um conjunto de helióstatos que são espelhos planos com base giratória cujo objetivo é direcionar a luz solar para um receptor de energia solar que fica no alto de uma torre, a luz solar concentra-se em um ponto conhecido como foco, nesse ponto é colocado o reator pirolítico, a vantagem desse método é que ele utiliza a luz solar que é uma fonte de energia 100% renovável (Hamilton et al., 2020; Joardder et al., 2017; Karellas; Roumpedakis, 2019; Pahnla et al., 2023; Sharma et al., 2023).

Vale ressaltar que nessa técnica de pirólise a temperatura depende do tipo de sistema utilizado para concentrar os raios solares no foco, por exemplo se for utilizado um espelho no formato de calha parabólica de eixo simples a faixa de temperatura pode variar entre 500 K e 700 K, caso esse sistema possua um duplo foco a temperatura ultrapassar 1500 K, já se for usado um espelho parabólico com eixo duplo a temperatura pode ir além de 1800 K, se for utilizado uma estação com um conjunto de helióstatos a temperatura pode passar de 1600 K (Joardder et al., 2017).

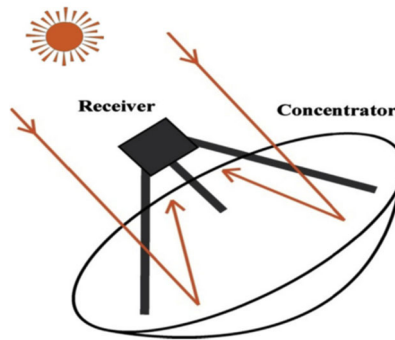
A Figura 2.11 representa um espelho no formato de calha parabólica, a Figura 2.12 representa um espelho parabólico e a Figura 2.13 representa uma estação com um conjunto de helióstatos. Em todos os casos, o reator pirolítico ficaria no foco, que é o ponto onde os raios de luz se concentram.

Figura 2.11 - Esquema de uma calha parabólica



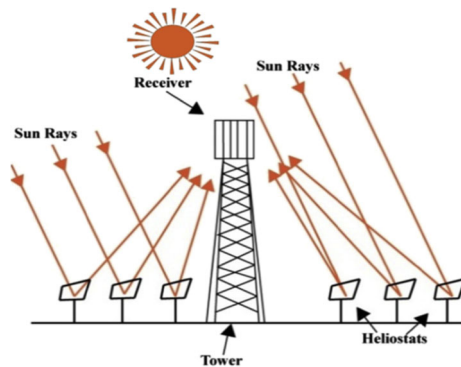
Fonte: Joardder et al., 2017

Figura 2.12 - Esquema de um espelho parabólico



Fonte: Joardder et al., 2017

Figura 2.13 - Esquema de uma estação com um conjunto de heliostatos



Fonte: Joardder et al., 2017

Porém esse método apresenta inúmeras desvantagens como por exemplo a dificuldade de manter o aquecimento uniforme, devido ao fato de o vento diminuir a eficiência do aquecimento, quanto maior for a velocidade do vento menor a eficiência do aquecimento, além disso a posição do sol muda conforme a época do ano e hora do dia, o que interfere na eficiência do aquecimento, além disso esse método é difícil de se aplicar em grande escala (Hamilton et al., 2020; Joardder et al., 2017; Karellas; Roumpedakis, 2019; Pahnla et al., 2023; Sharma et al., 2023).

2.4.3 Pirólise assistida por plasma

A pirólise assistida por plasma possui a vantagem de conseguir atingir temperaturas mais altas do que os outros métodos de pirólise. Com esse método, é possível atingir temperaturas superiores a 10000 K, pois esse método utiliza uma tocha de plasma, que pode ser vista na Figura 2.14, que é capaz de atingir essas temperaturas. Além disso, a pirólise assistida por plasma possui um tempo de residência muito curto e uma alta taxa de aumento de

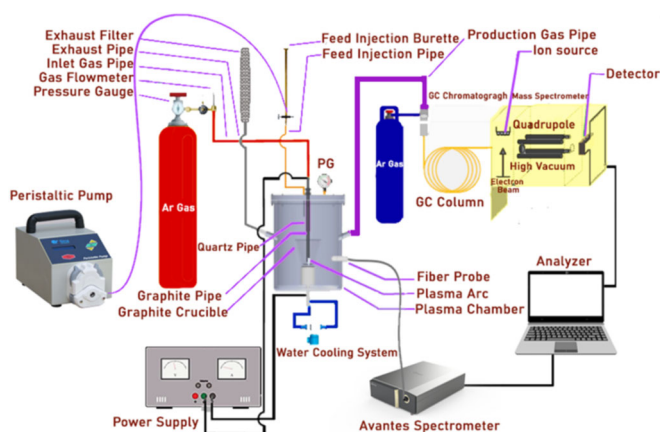
temperatura em relação aos outros métodos. Devido às altas temperaturas que esse método pode atingir, os compostos orgânicos são decompostos e os compostos inorgânicos são fundidos. Esse método produz um gás de pirólise de alta qualidade, devido ao seu alto poder de queima. Esse gás também pode ser utilizado como gás de síntese, devido à alta concentração de hidrogênio. Também é possível adaptar esse método para operar em regime contínuo. A principal desvantagem desse método é seu alto custo operacional devido ao alto gasto energético requerido para atingir temperaturas tão elevadas e ao fato de esse método exigir o uso de uma atmosfera inerte através do uso de argônio ou nitrogênio. Um esquema de um processo de pirólise assistida por plasma está representado na Figura 2.15 (Kheyriyeh et al., 2025; Leal-Quirós, 2004; Nema et al., 2016; Pahnla et al., 2023; Punčochář; Ruj; Chatterjee, 2012).

Figura 2.14 - Tocha de plasma de nitrogênio



Fonte: Nema et al., 2016

Figura 2.15 - Esquema de um processo de pirólise assistida por plasma

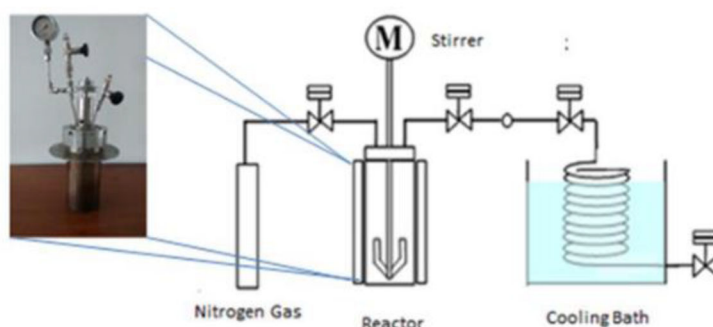


Fonte: Kheyriyeh et al., 2025

2.4.4 Carbonização Hidrotérmica

A carbonização hidrotérmica é um processo termoquímico semelhante ao processo de pirólise, utiliza uma autoclave para realizar o processo de carbonização. Comparado aos métodos de pirólise, sua temperatura de trabalho é mais baixa, pois esse método atinge temperaturas em uma faixa entre 150 °C e 260 °C. Esse processo termoquímico é realizado sob altas pressões que são atingidas devido ao fato de ser realizado com auxílio de vapor de água saturado a altas pressões. O esquema de um processo de carbonização hidrotérmica está representado na Figura 2.16. Esse método é utilizado para produzir hidrochar (Antero et al., 2019; Cardoso, 2020; Masoumi et al., 2021).

Figura 2.16 - Reator usado para carbonização hidrotérmica



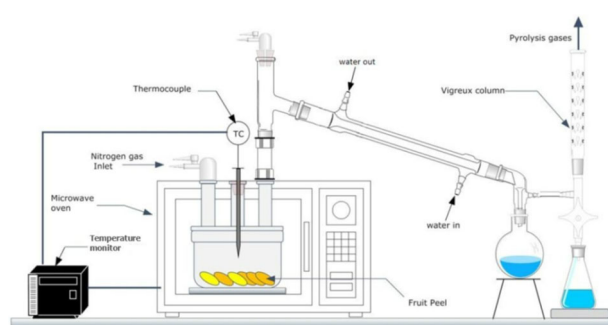
Fontes: Silva, 2021

2.4.5 Pirólise assistida por micro-ondas

A pirólise assistida por micro-ondas é similar a pirólise tradicional, porém ao invés de utilizar combustíveis ou resistores elétricos para fazer o aquecimento, radiação eletromagnética no comprimento das micro-ondas são utilizadas, as micro-ondas possuem frequência entre 0,3 GHz e 300 GHz, o princípio de funcionamento é semelhante a um forno de micro-ondas doméstico, porém com maior potência e diferente frequência, enquanto o forno de micro-ondas doméstico trabalha com radiação eletromagnética de frequência de 2,45 GHz, o aparelho de micro-ondas utilizado para a pirólise pode utilizar uma radiação eletromagnética de frequência diferente como por exemplo radiação eletromagnética com frequência de 0,915 GHz, 2,54 GHz ou 5,8 GHz, essas frequências possuem diferentes profundidades de penetração, a radiação eletromagnética de 0,915 GHz pode penetrar 55,6 cm no biochar, a com frequência 2,54 GHz pode penetrar 20,6 cm no biochar e a com frequência 5,8 GHz pode penetrar 8,5 cm no biochar. A principal vantagem desse método é que ele é mais econômico em termos energéticos do que

a pirólise tradicional, além de ser capaz de atingir temperaturas mais altas do que a pirólise tradicional, pois pode atingir temperaturas entre 450 °C e 600 °C e possuir uma taxa de aquecimento relativamente alta podendo chegar a 200 °C/s, vale ressaltar que as micro-ondas aquecem a biomassa ou o material que se deseja realizar a pirólise de dentro para fora, a principal desvantagem desse método é que ele possui uma dificuldade de aumentar a escala, devido ao aquecimento heterogêneo que pode ocorrer quando de aumenta escala, além disso deve-se tomar cuidado para não haver alguma contaminação metálica na biomassa, pois quando objetos metálicos são expostos às micro-ondas tendem a liberarem faíscas, por esse mesmo motivo não deve-se realizar pirólise de materiais que contenham metais na sua composição, como por exemplo embalagens cartonadas, pois embalagens cartonadas contêm alumínio em sua composição. A Figura 2.17 representa um aparato de pirólise assistida por micro-ondas (Alvarenga, 2013; Fang; Smith; Xu, 2020; MIT School of Engineering, 2025; Mushtaq; Mat; Ani, 2014; Pahnla et al., 2023; Tetra Pak, 2025). O mecanismo de aquecimento por micro-ondas pode ser observado na Figura 2.18 e na Figura 2.19.

Figura 2.17 - Esquema de um aparato de pirólise assistida por micro-ondas



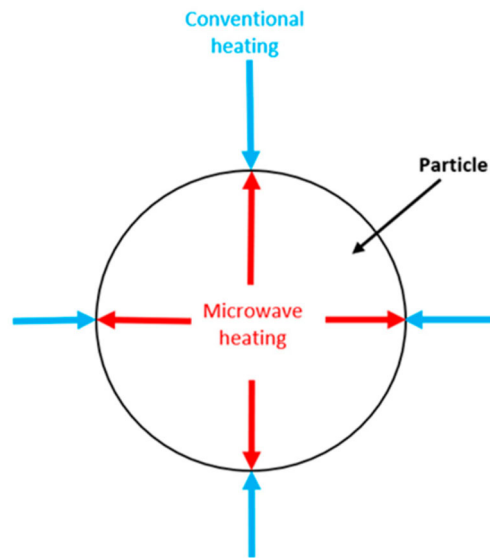
Fonte: Lam et al., 2017

Figura 2.18 - Corte de uma tora de madeira após ser irradiada por micro-ondas por 3 minutos



Fonte: Miura et al., 2004

Figura 2.19 - Mecanismo de aquecimento por micro-ondas



Fonte: Pahnla et al., 2023

2.4.6 Pirólise sob vácuo e atmosfera inerte

Fazer o processo de pirólise em pressões menores do que a atmosférica (vácuo) apresenta várias vantagens e desvantagens. Dentre as vantagens, pode-se citar a decomposição homogênea e acelerada dos produtos como resultado do menor número de moléculas gasosas interferindo na reação. Devido a isso, o processo fica mais barato, pois consome menos energia. Devido ao vácuo, o tempo de residência dos gases é menor, o que faz com que o rendimento do bio-óleo aumente. Contudo, esse método necessita de uma bomba de vácuo e o rendimento da obtenção do gás de pirólise é menor (Pahnla et al., 2023; Sharma et al., 2023).

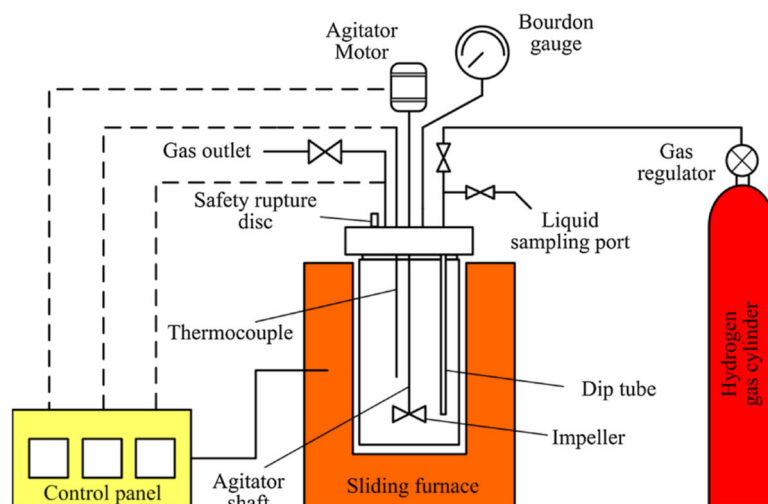
A atmosfera inerte, que pode ser alcançada com auxílio de gases como nitrogênio e argônio serve para prevenir que o oxigênio residual faça a biomassa ou qualquer outro material que se deseja realizar a pirólise entre em combustão, além disso o biochar produzido por esse método possui uma qualidade superior e esse método pode ser usado em muitos métodos de pirólise como a pirólise tradicional, a pirólise assistida por energia solar e a pirólise assistida por micro-ondas e esse método deve ser usado em conjunto com a pirólise assistida por plasma (Kheyriyeh et al., 2025; Sharma et al., 2023).

2.4.7 Hidropirólise

A hidropirólise é uma técnica em que a biomassa é submetida a uma atmosfera de hidrogênio com alta pressão, pressões que podem variar entre 20 bar e 60 bar. A qualidade do

bio-óleo usado nesse tipo de pirólise é superior a qualquer outra técnica de pirólise, visto que o bio-óleo possui menos umidade (menos de 1 % em massa), menos compostos oxigenados (menos de 1 % em massa) e menor acidez (TAN de aproximadamente 2), isso confere ao bio-óleo um maior poder de queima (aproximadamente 18000 BTU/lbm). O esquema de um aparato de hidropirólise está representado na Figura 2.20 (Kumar et al., 2020).

Figura 2.20 - Esquema de um processo de hidropirólise



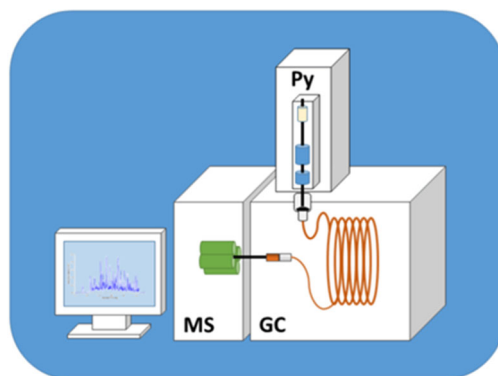
Fonte: Munir; Usman, 2018

2.4.8 Micropirólise

A micropirólise é uma técnica usada para investigar parâmetros que podem interferir na eficiência do processo de pirólise, como por exemplo, temperatura, pressão, tipo de biomassa ou qualquer outro material que se deseja fazer o processo de pirólise e o uso de catalisador. A vantagem desse processo é que ele é feito em pequena escala, o que permite analisar esses parâmetros gastando pouco material (Leon et al., 2022).

Para que a análise dos voláteis produzidos no processo de micropirólise seja possível, é acoplado junto ao equipamento de micropirólise um cromatógrafo gasoso e um espectrômetro de massas, que faz a análise dos gases que são liberados no processo de micropirólise. Na Figura 2.21, é possível visualizar como é feito o acoplamento do aparelho de micropirólise com o cromatógrafo gasoso e o espectrômetro de massas (Hou et al., 2025). A micropirólise é realizada tipicamente em uma atmosfera de gás inerte, o mais comum de ser usado é o gás hélio (Picó; Barceló, 2020).

Figura 2.21 - Pirolisador acoplado a um cromatógrafo gasoso com espectrômetro de massa



Fonte: Picó; Barceló, 2020

2.5 Métodos de pirólise

2.5.1 Pirólise lenta

A pirólise lenta possui uma taxa de aquecimento mais baixa e normalmente a temperatura de em que o processo ocorre é mais baixa do que a pirólise rápida, vale ressaltar que o tempo de residência do vapor também é maior, esse processo é usado há milênios para produzir o carvão vegetal e é até os dias de hoje utilizado em larga escala para produzir o carvão vegetal usado em churrasqueiras e fornos de pizzeria, esse processo é muito favorável para a produção de biochar, mas ele não é muito favorável para a produção de bio-óleo, a pirólise lenta pode durar minutos horas ou dias. (Pahnla et al., 2023; Pecha; Garcia-Perez, 2015; Pighinelli et al., 2018).

Vários tempos de duração diferentes podem ser encontrados na literatura, pois cada autor considera um intervalo de tempo diferente. Além disso, cada autor considera uma temperatura de trabalho diferente e cada autor considera uma taxa de aquecimento diferente. Por exemplo, Pecha; Garcia-Perez, 2015 consideram que a pirólise lenta pode ser classificada em dois tipos: a carbonização, que dura dias e é usada para produzir o carvão vegetal convencional usado em churrasqueiras. O processo de carbonização pode ser visto na Figura 2.22. E a pirólise lenta convencional, que dura entre 5 minutos e 30 minutos. O rendimento desse tipo de pirólise se tratando de carvão é entre 35 % e 50 %, enquanto o rendimento da obtenção do bio-óleo varia entre 25 % e 30 %. E sua taxa de aquecimento é menor que 10 °C/min, e sua temperatura de trabalho é entre 400 °C e 600 °C, a pirólise lenta pode ser realizada com partículas maiores do que 2 mm, o que flexibiliza o processo.

Figura 2.22 - Fabricação de carvão vegetal a partir do processo de carbonização



Fonte: Pecha; Garcia-Perez, 2015

Enquanto Mansor et al., 2018 consideram que a pirólise lenta tem taxa de aquecimento entre 0,1 °C/min e 100 °C/min, esse tipo de pirólise possui um maior rendimento na produção de biochar, que pode variar entre 25 % e 35 %, e o tempo de duração do processo de pirólise é entre 5 minutos e 30 minutos. Kumar et al., 2020 consideram que a pirólise lenta possui um tempo de residência do vapor entre 5 e 30 minutos e que ela ocorre a temperaturas próximas a 400 °C. Li et al., 2021, consideram que a pirólise lenta dura entre 10 e 60 minutos e que sua taxa de aquecimento é entre 5 °C/s e 20 °C/s, e a temperatura em que ocorre o processo é entre 300 °C e 600 °C. Kumar; Panwar, 2024, consideram que a pirólise lenta possui uma taxa de aquecimento entre 0,1 °C/s e 0,8 °C/s. A maioria das pirólises lentas ocorrem entre 5 e 30 minutos, enquanto em alguns casos o tempo de duração de pirólise é de 25 h e 30 h. A faixa de temperatura em que esse método de pirólise ocorre é entre 300 °C e 550 °C. Tan et al., 2021, consideram que a pirólise lenta ocorre entre 300 °C e 700 °C, com uma taxa de aquecimento entre 0,1 °C/min e 10 °C/min e que seu tempo de duração pode variar de minutos a horas.

2.5.2 Pirólise rápida

A pirólise rápida possui uma taxa de aquecimento mais alta do que a pirólise lenta e normalmente a temperatura em que ocorre o processo é mais alta e o tempo de residência do vapor é menor, vale ressaltar que a sua duração é menor, quando comparada à pirólise lenta. Esse processo é usado para produzir bio-óleo, pois o rendimento da obtenção de bio-óleo utilizando esse método é maior quando comparado com a pirólise lenta, porém o rendimento da obtenção de biochar é menor do que o da pirólise lenta (Pahnila et al., 2023; Pecha; Garcia-Perez, 2015; Pighinelli et al., 2018).

Assim como na pirólise lenta, cada autor define um tempo de duração diferente, um tempo de residência do gás diferente, uma taxa de aumento da temperatura diferente e uma temperatura de trabalho diferente. Pecha; Garcia-Perez, 2015, consideram que a pirólise rápida possui uma taxa de aquecimento maior do que 100 °C/s. A temperatura em que o processo ocorre está entre 400 °C e 650 °C. Os reatores de pirólise rápida são projetados para condensar o bio-óleo em menos de 2 s. O rendimento do bio-óleo está entre 60 % e 75 %, enquanto o rendimento do carvão está entre 15 % e 25 % e o rendimento do gás de pirólise está entre 10 % e 15 %.

De acordo com Mansor et al., 2018, a pirólise rápida dura entre 0,5 s e 2 s, a taxa de aquecimento é maior do que 100 °C/min, e a temperatura de trabalho é entre 400 °C e 600 °C. Kumar et al., 2020, consideram que a pirólise rápida ocorre a temperaturas próximas a 500 °C e que o tempo de residência do vapor é menor quando comparado à pirólise lenta. Kumar; Panwar, 2024, considera que a pirólise rápida dura entre 1 segundo e 5 segundos, sua temperatura de trabalho está entre 800 °C e 1250 °C, o rendimento para a produção do biochar está entre 10 % e 25 %, para a produção de bio-óleo está entre 65 % e 75 %, enquanto o rendimento para a produção de gás de pirólise está entre 10 % e 20 %. Tan et al., 2021, consideram que a pirólise rápida dura apenas alguns segundos e que sua temperatura de trabalho está entre 600 °C e 1000 °C, e que sua taxa de aquecimento está entre 10 °C/min e 10000 °C/min.

2.5.3 Pirólise flash

A pirólise flash possui uma taxa de aquecimento ainda mais alta do que a pirólise rápida e um tempo de residência ainda mais curto, pois ele dura algumas frações de segundo. O rendimento da produção de bio-óleo é ainda maior do que o da pirólise rápida (Pahnila et al., 2023). De acordo com Pahnila et al., 2023, a taxa de aquecimento da pirólise flash pode chegar a 2500 °C/s e a temperatura de operação pode passar de 1000 °C, e sua duração é menor do que 0,5 s. Para Kumar et al., 2020, a pirólise flash possui um rendimento na produção de bio-óleo superior a 75 %, e esse processo possui um tempo de residência dos vapores menor do que 1 s e ele é feito a temperaturas superiores a 1000 °C.

2.5.4 Pirólise intermediária

Alguns autores consideram que, além da pirólise lenta, rápida e a flash, existe a pirólise intermediária, que seria um meio termo entre a pirólise lenta e a pirólise rápida. Esse método

possui um maior rendimento na produção de carvão e bio-óleo e um menor rendimento na obtenção de gás de pirólise. Apesar de ser gerado pouco gás, o gás produzido pode ser usado na geração de energia elétrica e/ou na geração de calor, pois o gás produzido possui pouco ou nenhum óleo (Pahnila et al., 2023). Para Pahnila et al., 2023, a pirólise intermediária possui uma taxa de aquecimento entre 1 °C/s e 10 °C/s, a temperatura de operação desse processo está entre 400 °C e 650 °C e o tempo de residência do vapor pode ser curto ou longo, pois ele pode variar entre 0,5 s e 20 s ou entre 300 s e 1000 s.

A Universidade de Aston, na Inglaterra, desenvolveu patentes de processos pirolíticos. Uma das patentes, que é de um processo de pirólise intermediário que tem a capacidade de processar 20 kg/h de matéria-prima, tem o rendimento da produção de bio-óleo entre 49 % e 54,3 % e o biochar foi obtido com um rendimento entre 28,5 % e 30,1 % (Bridgwater; Gerhauser; Effendi, 2011; Hornung; Apfelbacher, 2010; Mansor et al., 2018; Mayer; Apfelbacher; Hornung, 2012; Yang et al., 2014).

2.5.5 Pirólise com aquecimento segmentado

A pirólise com aquecimento segmentado é um método de pirólise que permite que o processo pirolítico seja mais econômico, visto que com esse processo é possível reduzir em até 22,5 % o consumo energético em relação à pirólise tradicional. Esse método aproveita do princípio de que até por volta de 280 °C, porém essa temperatura pode variar a depender da biomassa que é utilizada, a pirólise é um processo endotérmico, porém a partir dessa temperatura o processo se torna exotérmico. Basicamente, o que esse método faz é dividir o processo em dois estágios: um estágio em que o calor é adicionado utilizando uma fonte de calor externa ao reator pirolítico e um segundo estágio em que o processo se torna adiabático. No primeiro estágio, o reator é aquecido até a temperatura em que a pirólise se torna um processo exotérmico, a partir daí o processo passa a ser adiabático, pois o calor necessário para o processo ocorrer vem do próprio processo de pirólise (Pahnila et al., 2023).

2.6 Uso de catalisadores nos processos de pirólise

O uso de catalisadores tem como objetivo aumentar o rendimento do processo de produção de bio-óleo e/ou aumentar a seletividade da produção de algumas substâncias presentes no bio-óleo, com o intuito de melhorar sua qualidade. Em alguns casos, o uso de catalisadores faz com que o rendimento da produção do bio-óleo diminua, porém a qualidade do bio-óleo aumenta. Um bio-óleo considerado de boa qualidade é aquele que possui um alto

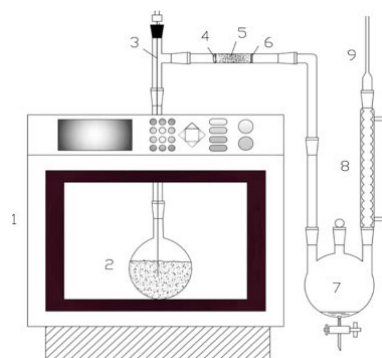
teor de hidrocarbonetos e um baixo teor de compostos oxigenados. Alguns exemplos de catalisadores usados nos processos de pirólise são o óxido de cálcio, pentóxido de nióbio, vermiculita e zeólitas como HZSM-5, HMOR, HUSY, e Hb (Bezerra et al., 2016; Brandão et al., 2009; Oliveira, 2015a, 2015b; Rajmohan et al., 2020; Reza et al., 2023; Silva, 2020; Souza et al., 2024).

Os processos pirolíticos catalíticos podem ser *in-situ*, que ocorre quando o catalisador é misturado diretamente com a biomassa, ou *ex-situ*, que ocorre quando o catalisador não está misturado com a biomassa. Normalmente, nos processos catalíticos *ex-situ*, os catalisadores estão em um leito fixo (Aliyu; Lee; Harvey, 2021). O processo pirolítico catalítico *in-situ* possui como vantagem o menor custo de capital comparado ao processo catalítico *ex-situ*, pois nesse processo é utilizado apenas um reator, que é o reator pirolítico, porém possui como desvantagem a dificuldade em separar o catalisador do biochar ao final do processo. Já o processo pirolítico *ex-situ* possui a vantagem de o catalisador e a biomassa estarem em reatores diferentes, o que dispensa o processo de separação entre o catalisador e o biochar, porém isso faz com que o custo de capital do processo pirolítico *ex-situ* seja maior (Iisa et al., 2016; Shirazi; Viamajala; Varanasi, 2020).

Os catalisadores fazem com que os grupos funcionais oxigenados de substâncias presentes no bio-óleo sejam removidos. Dentre essas reações estão a descarboxilação, a desoxigenação, a descarbonilação e a desidratação (Silva, 2020). Dentre as substâncias oxigenadas presentes no bio-óleo estão cetonas, aldeídos, ácidos carboxílicos, álcoois, fenóis, éteres, ésteres, furanos e açúcares (Silva, 2020).

Um esquema de um processo pirolítico assistido por micro-ondas usando catalisadores *ex-situ* está representado na Figura 2.23, na Figura 2.23 o número 1 representa um forno de micro-ondas, 2 representa um reator de quartzo, 3 representa um termopar tipo K, 4 representa uma lâ de quartzo, 5 representa o leito catalítico, 6 representa um disco furado que serve como um suporte para o leito catalítico, 7 representa um recipiente que serve para coletar o bio-óleo, 8 representa um condensador e 9 representa a saída para a bomba de vácuo (Fan et al., 2017).

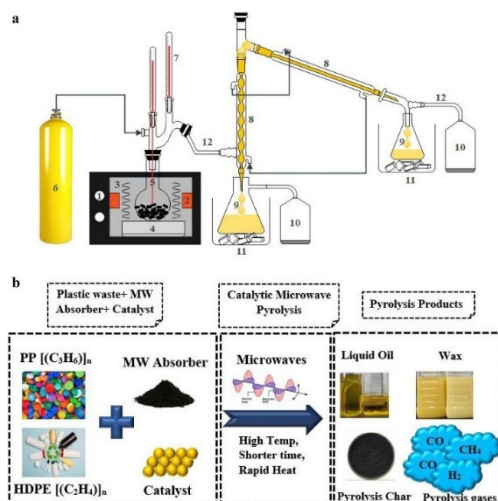
Figura 2.23 - Esquema de um processo pirolítico assistido por micro-ondas *ex-situ*



Fonte: Fan et al., 2017

O esquema de um processo pirolítico usando catalisadores *in-situ* está representado na Figura 2.24, na Figura 2.24 o número 1 representa o forno de micro-ondas, 2 representa o guia de ondas do forno de micro-ondas, 3 é uma representação das micro-ondas, 4 é um suporte de cerâmica, 5 representa o reator, 6 representa um cilindro de gás inerte, que no caso o gás utilizado no processo é o nitrogênio, 7 representa os termômetros, 8 representa os condensadores, 9 representa os coletores de bio-óleo, 10 representa os coletores de gás, 11 representa banhos de gelo e 12 representam tubos conectores (Fan et al., 2017).

Figura 2.24 - Esquema de um processo pirolítico *in-situ* assistido por micro-ondas



Fonte: Irfan et al., 2023

2.7 Exemplos de processos de pirólise de biomassa

2.7.1 Pirólise da casca do fruto do jatobá do cerrado (*Hymenaea stigonocarpa*)

A pirólise da casca do fruto do jatobá do cerrado pode ser utilizada para produzir carvão ativado que serve para remoção de poluentes emergentes como cafeína e paracetamol em efluentes aquosos, tanto o biochar ativado quanto o hidrochar ativado obtidos a partir da casca do jatobá obtiveram um rendimento superior ao do carvão ativado comercial na remoção de cafeína e de paracetamol de efluentes aquosos, os resultados dos experimentos que foram realizados com concentrações de 100 mg/L de adsorbato estão representados na Tabela 2.1 (Cardoso, 2020).

Tabela 2.1 - Eficiência de remoção de cada adsorvente para a cafeína e o paracetamol

Adsorvente/Adsorbato	Paracetamol	Cafeína
Carvão ativado comercial	68,40 ± 0,003	71,44 ± 0,004
Hidrochar ativado	87,89 ± 0,002	93,32 ± 0,003
Biochar ativado	88,38 ± 0,004	99,81 ± 0,003

Fonte: (Cardoso, 2020)

2.7.2 Pirólise da casca do tronco do jatobá do cerrado, caroço de pequi e casca do fruto de baru

A partir da casca do tronco do jatobá do cerrado e de outras biomassas de plantas do cerrado, como o caroço do pequi (*Caryocar brasiliense Camb.*) e a casca do fruto do baru (*Dipteryx alata Vog.*), é possível obter carvão e bio-óleo. MIRANDA, 2017 realizou ensaios de pirólise utilizando caroço de pequi, casca do fruto do baru e a casca da árvore do jatobá do cerrado. Foram realizados ensaios com partículas maiores que 40 mesh e com partículas menores que 60 mesh. Os resultados dos ensaios de pirólise de partículas maiores do que 40 mesh estão representados na Tabela 2.2, na Tabela 2.3 e na Tabela 2.4 para partículas de casca da árvore do jatobá do cerrado, para as partículas de caroço de pequi e para partículas de casca do fruto de baru, respectivamente. E os resultados dos ensaios de pirólise de partículas menores do que 60 mesh estão representados na Tabela 2.5, na Tabela 2.6 e na Tabela 2.7 para partículas de casca da árvore do jatobá do cerrado, para as partículas de caroço de pequi e para partículas de casca do fruto de baru, respectivamente. As propriedades de alguns bio-óleos obtidos estão representadas na Tabela 2.8.

Tabela 2.2 - Pirólise de partículas de casca do tronco do jatobá maiores que 40 mesh

Ensaio	Temperatura (°C)	Taxa de aumento de temperatura (°C/min)	Tempo de reação (h)	Rendimento da obtenção de carvão (%)	Rendimento da obtenção de bio-óleo (%)
1	430	2	7	43,28	32,24
2	430	2	3,5	46,51	31,54
3	600	2	3,5	38,36	35,67
4	600	5	3,5	38,59	36,55

Fonte: Miranda, 2017

Tabela 2.3 - Pirólise de partículas de caroço de pequi maiores do que 40 mesh

Ensaio	Temperatura (°C)	Taxa de aumento de temperatura (°C/min)	Tempo de reação (h)	Rendimento da obtenção de carvão (%)	Rendimento da obtenção de bio-óleo (%)
1	430	2	7	40,51	43,24
2	430	2	3,5	42,26	42,67
3	600	2	3,5	25,03	52,77
4	600	5	3,5	26,29	53,66

Fonte: Miranda, 2017

Tabela 2.4 - Pirólise de partículas de casca do fruto de baru maiores do que 40 mesh

Ensaio	Temperatura (°C)	Taxa de aumento de temperatura (°C/min)	Tempo de reação (h)	Rendimento da obtenção de carvão (%)	Rendimento da obtenção de bio-óleo (%)
1	430	2	7	34,92	46,84
2	430	2	3,5	38,08	47,19
3	600	2	3,5	31,74	46,96
4	600	5	3,5	30,62	54,13

Fonte: Miranda, 2017

Tabela 2.5 - Pirólise de partículas de casca da árvore do jatobá menores do que 60 mesh

Ensaio	Temperatura (°C)	Taxa de aumento de temperatura (°C/min)	Tempo de reação (h)	Rendimento da obtenção de carvão (%)	Rendimento da obtenção de bio-óleo (%)
2	430	2	3,5	43,83	33,26
4	600	5	3,5	38,11	37,07

Fonte: Miranda, 2017

Tabela 2.6 - Pirólise de partículas de caroço de pequi menores do que 60 mesh

Ensaio	Temperatura (°C)	Taxa de aumento de temperatura (°C/min)	Tempo de reação (h)	Rendimento da obtenção de carvão (%)	Rendimento da obtenção de bio-óleo (%)
1	430	2	7	35,73	43,86
2	430	2	3,5	36,62	37,39
3	600	2	3,5	25,96	51,34
4	600	5	3,5	26,14	53,03

Fonte: Miranda, 2017

Tabela 2.7 - Pirólise de partículas de casca do fruto de baru menores do que 60 mesh

Ensaio	Temperatura (°C)	Taxa de aumento de temperatura (°C/min)	Tempo de reação (h)	Rendimento da obtenção de carvão (%)	Rendimento da obtenção de bio-óleo (%)
2	430	2	3,5	39,83	44,89
4	600	5	3,5	29,47	53,95

Fonte: Miranda, 2017

Tabela 2.8 - Propriedade de alguns dos bio-óleos obtidos

Bio-óleo/Análise	Granulometria	Teor de enxofre (ppm)	Viscosidade cinemática (40 °C) (mm ² /s)	Densidade (g/cm ³)	Acidez (mgKOH/g)
Casca do fruto do baru	>40 mesh	360	2,41	1,05	193,54
Casca do fruto do baru	<60 mesh	406,5	1,34	1,03	179
Casca do fruto do baru	>40 mesh	355,9	2,22	1,06	184,72
Casca do fruto do baru	<60 mesh	341,2	2,55	1,07	189,25
Casca da árvore de jatobá do cerrado	>40 mesh	411,4	0,99	1,03	103,74
Casca da árvore de jatobá do cerrado	<60 mesh	384,1	1,05	1,02	113,90
Casca da árvore de jatobá do cerrado	>40 mesh	374	0,98	1,33	87,89
Casca da árvore de jatobá do cerrado	<60 mesh	369,3	1,10	1,28	94,27
Caroço de pequi	>40 mesh	953,7	15,57	0,89	90,11
Caroço de pequi	<60 mesh	836,5	14,52	0,86	74,30
Caroço de pequi	>40 mesh	736,8	16,54	0,92	107,66
Caroço de pequi	<60 mesh	682,9	24,33	0,95	113,99

Fonte: Miranda, 2017

2.7.3 Produção de gás de síntese a partir da pirólise da madeira assistida por micro-ondas

A pirólise de pelotas de madeira pode ser útil na geração de gás de síntese, que é uma mistura de CO₂, CO, CH₄, H₂, e pequenas quantidades de C₂H₄, C₂H₆, C₃H₆ e C₃H₈. Junto desse

gás também foram gerados biochar, bio-óleo, água e produtos não identificados (Zhou et al., 2020).

Zhou et al., 2020, realizaram experimentos envolvendo a pirólise rápida de cavaco de madeira utilizando micro-ondas com o intuito de se obter gás de pirólise. Foram realizados experimentos com as temperaturas de 630 °C, 680 °C, 740 °C e 800 °C. Conforme a temperatura aumenta, maior é a quantidade de biogás produzido. A temperatura de 800 °C, o rendimento da obtenção de gás de pirólise foi de 72,2 % em massa.

2.7.4 Pirólise catalítica *in-situ* de palha de milho, usando óxido de cálcio como catalisador

Wang et al., 2020 analisaram os efeitos do uso do óxido de cálcio (CaO) como catalisador no processo de pirólise da palha do milho. No experimento, o catalisador foi misturado com a biomassa, em outras palavras, o processo catalítico foi *in-situ*. Foram analisadas várias situações, como temperaturas de trabalho diferentes e proporções diferentes entre catalisador e biomassa. Para analisar o efeito da proporção massa de óxido de cálcio/massa de palha de milho, foram feitos vários experimentos com proporções diferentes entre massa de catalisador e massa de palha de milho. Para realizar esse experimento, foi necessário um equipamento que fosse capaz de aquecer essa mistura de catalisador e biomassa de 40 °C para 900 °C a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, Os parâmetros foram analisados utilizando FTIR (espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier). As situações analisadas foram a pirólise da biomassa utilizando 1 parte de catalisador para 20 partes de biomassa, 1 parte de catalisador para 10 partes de biomassa, 1 parte de catalisador para 5 partes de biomassa, 1 parte de catalisador para 2 partes de biomassa e 1 parte de catalisador para 1 parte de biomassa. Observou-se que utilizando a proporção 1:2 houve uma maior formação de água, a proporção 1:20 houve uma maior formação de CO₂, a proporção 1:10 houve um maior rendimento na formação de CO, a proporção 1:20 houve a maior formação de ácidos carboxílicos, o que era esperado, visto que o óxido de cálcio reage com os ácidos formando seus respectivos sais e a altas temperaturas os sais de ácidos carboxílicos sofrem reações de descarboxilação, reação que transforma o sal de ácido carboxílico em um hidrocarboneto e carbonato de cálcio, ou descarboxilação cetônica que são reações que transformam sais de ácidos carboxílicos em cetonas ou aldeídos. A proporção 1:10 foi a que observou a maior formação de compostos carbonílicos (aldeídos e cetonas), a proporção 1:1 foi a que apresentou a maior formação de fenóis e a proporção 1:2 proporcionou a melhor formação de hidrocarbonetos aromáticos.

Chegou-se à conclusão de que a melhor proporção entre óxido de cálcio e palha de milho é entre 1:1 e 1:2 (Renz, 2005).

Wang et al., 2020 também analisaram amostras com e sem presença de catalisador a diferentes temperaturas. Para fazer a análise de amostras com catalisador, foi escolhida a proporção 1:20 e as temperaturas escolhidas foram 291 °C, 335 °C e 520 °C. Os parâmetros analisados foram rendimento da obtenção de bio-óleo, rendimento da obtenção de biochar, água formada e rendimento da obtenção de gás de pirólise. Os resultados dos experimentos estão representados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Resultados dos experimentos que compararam as proporções de catalisador

Amostra	CaO/palha	Temperatura (°C)	Rendimento da obtenção de bio-óleo (%)	Rendimento da obtenção de biochar (%)	Água formada (%)	Rendimento da obtenção de gás de pirólise (%)
1	0:1	291	9,00	55,80	22,00	13,00
2	1:20	291	8,10	59,31	19,29	13,30
3	0:1	335	13,33	50,25	22,00	14,42
4	1:20	335	8,19	56,52	20,24	15,05
5	0:1	520	14,03	39,75	22,75	23,47
6	1:20	520	13,55	43,12	23,33	20,00

Fonte: Wang et al., 2020

2.7.5 Pirólise catalítica de óleo de soja com o objetivo de produzir biocombustíveis utilizando pentóxido de nióbio (Nb_2O_5) e catalisadores baseados no pentóxido de nióbio

Brandão et al., 2009 realizaram experimentos envolvendo transesterificação de óleo de soja utilizando como catalisador Nb_2O_5 , $\text{Nb}_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Nb_2O_5 , $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{H}_3\text{PO}_4$, $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{HNO}_3$, $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{H}_2\text{SO}_4$, também foram feitos experimentos de esterificação direta dos ácidos graxos do óleo de soja e pirólise do óleo de soja envolvendo esses mesmos catalisadores. Os experimentos de pirólise foram realizados utilizando 1 g de catalisador para 100 g de óleo de soja e foi feito um experimento utilizando 0,5 g de $\text{Nb}_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$ para 100 g de óleo de soja. Dentre os produtos desse processo de pirólise estão acroleína, hidrocarbonetos de cadeia longa saturados e insaturados, ácidos graxos e acetona. A presença de ácidos graxos no produto impossibilita o seu uso como combustível, mas é possível reduzir a concentração dessas substâncias alterando

as propriedades do catalisador. O catalisador que obteve o melhor rendimento foi $\text{Nb}_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$, pois foi obtido um rendimento de 72,0 %, enquanto o que obteve uma melhor qualidade do bio-óleo foi o Nb_2O_5 , pois apesar do rendimento ser apenas de 65,0 %, sua acidez foi a menor dentre todos os bio-óleos obtidos, visto que sua acidez foi de apenas 121 mg de KOH/g de bio-óleo, enquanto a pirólise usando $\text{Nb}_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$ apresentou uma acidez de 172 mg de KOH/g de bio-óleo.

2.7.6 Pirólise de resíduos de cevada de cervejarias na presença e na ausência de catalisadores

Santos et al., 2025 realizaram a pirólise de resíduos de cevada provenientes de cervejarias. Foram feitos experimentos sem catalisador e experimentos com catalisadores baseados em CaO e Nb_2O_5 e foi usado também resíduos de mineração contendo óxido de cálcio. Os catalisadores utilizados foram o óxido de cálcio com pureza superior a 99 %, catalisador de ferro suportado em óxido de cálcio, mistura de óxido de cálcio com óxido de magnésio, pentóxido de nióbio impregnado com níquel, pentóxido de níquel reduzido e passivado e pentóxido de níquel calcinado. Os testes com e sem os respectivos catalisadores foram feitos a temperaturas de 550 °C, 650 °C e 750 °C. O maior rendimento na obtenção de hidrocarbonetos foi obtido a 750 °C usando óxido de cálcio puro como catalisador, o rendimento obtido foi de 39 %. O experimento sem catalisador realizado a 650 °C foi o que mais produziu ácido, visto que o rendimento da obtenção de ácido foi de 7 %. Os experimentos realizados com catalisador de pentóxido de nióbio impregnado com níquel, realizados a 550 °C e 650 °C e o experimento realizado com pentóxido de níquel reduzido foram os que mais produziram aldeídos. O rendimento da produção de aldeído nesses experimentos foi de 14%. Os experimentos realizados sem catalisador a 650 °C e usando catalisador de ferro suportado em óxido de cálcio foram os que obtiveram maior rendimento na produção de álcoois, o rendimento foi de 10 % em ambos os experimentos. O experimento realizado a 650 °C usando pentóxido de níquel calcinado foi o que obteve melhor rendimento na produção de cetonas, o rendimento obtido foi de 28 %. O experimento realizado a 550 °C usando pentóxido de nióbio reduzido foi o que obteve maior rendimento na obtenção de fenóis, o rendimento foi de 8%. O experimento realizado a 550 °C utilizando pentóxido de nióbio impregnado com níquel foi o que obteve maior rendimento na produção de furanos, o rendimento foi de 18 %. O experimento realizado a 550 °C sem catalisador foi o que obteve uma maior formação de açúcares, a formação de açúcares foi de 25 %. O experimento realizado a 550 °C usando catalisador de ferro suportado em óxido de cálcio foi o que houve maior formação de compostos nitrogenados, a composição foi de 27 %. A formação de outros compostos foi mais perceptível no experimento realizado

sem catalisador a 550 °C, a formação foi de 9 %. Compostos desconhecidos foram formados com mais intensidade no experimento realizado a 650 °C e utilizando catalisador de ferro suportado em óxido de cálcio. A formação de compostos desconhecidos foi de 17 %.

2.7.7 Pirólise catalítica *ex-situ* de palha de arroz usando zeólitas ZSM-5, Al-MCM-41, Al-MSU-F e cinzas de cascas de arroz como catalisador

Abu Bakar; Titiloye, 2013 fizeram a pirólise da palha de arroz a 450 °C com uma taxa de aquecimento de 25 °C/min, catalítica rápida *ex-situ*, usando zeólitas ZSM-5, Al-MCM-41, Al-MSU-F e cinzas de cascas de arroz como catalisadores. A proporção de catalisador para biomassa usada foi de 1:100 e os parâmetros analisados no experimento foram rendimento da produção de gás de pirólise, biochar e bio-óleo. O maior rendimento de biochar foi observado no uso da zeólita Al-MSU-F, o seu valor foi de 43,31. O maior rendimento da obtenção de líquidos (água e bio-óleo), que foi de 39,98 %, foi observado no uso da zeólita Al-MCM-41. O maior rendimento na obtenção de gases foi observado no uso das cinzas de cascas de arroz como catalisador, o rendimento observado foi de 21,62.

Para analisar a qualidade do bio-óleo, foram analisadas as seguintes frações: hidrocarbonetos aromáticos, ácidos orgânicos, furanos, cetonas, fenóis de baixo peso molecular, fenóis de alto peso molecular e anidridos de açúcares. A zeólita ZSM-5 foi a que houve a maior formação de hidrocarbonetos aromáticos, a fração de hidrocarbonetos aromáticos no bio-óleo foi de 2,24. O uso das cinzas de cascas de arroz como catalisador foi o que proporcionou a maior fração de ácidos orgânicos no bio-óleo, a fração foi de 16,16. A zeólita ZSM-5 também proporcionou a maior formação de furanos, a fração de furanos no bio-óleo foi de 9,63. O uso das cinzas de cascas de arroz como catalisador também foi o que proporcionou a maior formação de cetonas, a fração de cetonas no bio-óleo foi de 14,76. A zeólita ZMF-5 foi a que proporcionou maior formação de fenóis de baixo peso molecular no bio-óleo, a fração foi de 14,44. A maior fração de fenóis de alto peso molecular foi observada no uso da zeólita Al-MCM-41, a fração foi de 14,99. A ausência de catalisador foi a que proporcionou a maior formação de anidridos de açúcares, a fração de anidridos de açúcares no bio-óleo foi de 3,65.

2.7.8 Pirólise *in-situ* de madeira de faia usando diferentes catalisadores

Stefanidis et al., 2011 fizeram a pirólise *in-situ* de madeira de faia usando diferentes catalisadores com zeólita ZMF-5 com áreas superficiais de 61 m²/g, 90 m²/g e 138 m²/g, FCC,

óxido de magnésio com áreas superficiais de 40 m²/g e 52 m²/g, óxido de níquel, alumina com áreas superficiais de 93 m²/g, 160 m²/g, 193 m²/g e 215 m²/g, ZrO₂/TiO₂, zircônia tetragonal, sílica alumina e areia de sílica. Os experimentos de pirólise foram realizados a 500 °C.

Foram analisados o rendimento do biochar, da fase líquida (bio-óleo misturado com água) e do gás de pirólise. O catalisador que obteve o melhor rendimento tanto da fase líquida quanto do bio-óleo foi a areia de sílica, com um rendimento de 58,76 % para a fase líquida e de 37,37 % do bio-óleo. O catalisador que obteve o melhor rendimento na obtenção do biochar foi a alumina com área superficial de 215 m²/g o rendimento foi 29,61 %, enquanto o ZrO₂/TiO₂ foi o que obteve o melhor rendimento na obtenção do biochar, o rendimento foi de 33,85 %.

Os parâmetros de qualidade do bio-óleo que foram analisados foram as frações de hidrocarbonetos aromáticos, alifáticos e poliaromáticos, fenóis, furanos, ácidos orgânicos, ésteres, éteres, álcoois, aldeídos, açúcares, compostos nitrogenados, compostos pesados e desconhecidos. O catalisador que mais contribuiu para a formação de hidrocarbonetos aromáticos, de furanos e de hidrocarbonetos poliaromáticos foi a alumina com 215 m²/g de área superficial. A fração de hidrocarbonetos aromáticos no bio-óleo foi de 10,8 %, a fração de furanos no bio-óleo foi de 2,2 %, a fração de hidrocarbonetos poliaromáticos foi de 12,6 %. O catalisador que mais promoveu a formação de hidrocarbonetos alifáticos e de fenóis foi o ZrO₂/TiO₂, a fração desses hidrocarbonetos no bio-óleo foi de 0,8 % e a fração de fenóis no bio-óleo foi de 39,0 %. A alumina com 93 m²/g de área superficial foi a que mais contribuiu para a formação de ácidos orgânicos, de aldeídos e de compostos desconhecidos. A fração desses ácidos no bio-óleo foi de 18,2 % e a fração de aldeídos foi de 3,6 % e a fração de compostos desconhecidos no bio-óleo foi de 40 %. A sílica alumina foi a que mais contribuiu para a formação de ésteres e de compostos desconhecidos, a fração de ésteres no bio-óleo foi de 1,4 % e a fração de compostos desconhecidos foi de 28 %. A alumina com 193 m²/g de área superficial foi a que mais contribuiu para a formação de álcoois no bio-óleo, a fração de álcoois no bio-óleo foi de 2,8 %. A alumina com 160 m²/g de área superficial foi a que mais contribuiu para a formação de éteres. A fração de éteres no bio-óleo foi de 3,2 %. O óxido de magnésio com área superficial de 40 m²/g foi o que mais contribuiu para a formação de cetonas, a fração de cetonas no bio-óleo foi de 9,1 %. O óxido de magnésio com área superficial de 52 m²/g e o óxido de níquel foram os que mais contribuíram para a presença de açúcares no bio-óleo. A fração de açúcares no bio-óleo em ambos os casos foi de 0,6 %. A zeólita ZMF-5 foi a que proporcionou uma maior formação de compostos nitrogenados no bio-óleo. A fração de compostos nitrogenados no bio-óleo foi de 1,5 %.

Os parâmetros de qualidade do gás de pirólise analisados foram os rendimentos de dióxido de carbono, de monóxido de carbono, de hidrogênio, de metano e de hidrocarbonetos entre 2 e 4 carbonos. O catalisador que mais contribuiu para a formação de dióxido de carbono foi o óxido de níquel, o rendimento de CO₂ foi de 16,15 %. O maior rendimento na obtenção de CO foi observado usando a zeólita ZMF-5 com 138 m²/g de área superficial, o rendimento de monóxido de carbono foi de 11,43 %. O catalisador que mais contribuiu para a formação de hidrogênio foi o ZrO₂/TiO₂, com rendimento de hidrogênio de 0,28 %. O catalisador que apresentou maior rendimento de CH₄ foi a alumina com 215 m²/g de área superficial, o rendimento de metano foi de 1,83 %. E o catalisador que apresentou um maior rendimento na obtenção de hidrocarbonetos entre 2 e 4 carbonos na cadeia foi o ZrO₂/TiO₂, o rendimento foi de 1,21 %.

2.7.9 Pirólise *in-situ* de cascas de nozes usando hidróxido de potássio, carbonato de potássio e carbonato de lítio como catalisador

He et al., 2024 fizeram a pirólise *in-situ* de casca de nozes, usando diversos catalisadores. Os catalisadores usados foram o hidróxido de potássio, carbonato de potássio, carbonato de lítio e carbonato de sódio. Foi feito um teste na ausência de catalisadores. Os experimentos foram feitos a uma temperatura de 700 °C. O experimento com o hidróxido de potássio foi o que obteve o maior rendimento de carvão e de gás de pirólise, além disso o gás de pirólise produzido pelo experimento que usou o hidróxido de potássio como catalisador foi o que apresentou maior fração de hidrogênio, visto que o gás de pirólise produzido por esse experimento possui uma fração de 25,05 %, porém o biochar produzido na presença de hidróxido de potássio não foi o que apresentou a maior área superficial, visto que sua área superficial foi de 427 m²/g, o carbonato de potássio é o catalisador que produziu o carvão com maior área superficial, visto que sua área superficial foi de 598,6 m²/g. A ausência de catalisadores produziu um maior rendimento na obtenção de bio-óleo e favoreceu a formação de ácidos carboxílicos, aldeídos, aminas e outros compostos como hidrocarbonetos, tiofenos, éteres, outros compostos nitrogenados etc. O carbonato de lítio favoreceu a formação de cetonas e ésteres. O carbonato de lítio favoreceu a formação de fenóis. Os rendimentos de carvão, bio-óleo e gás de pirólise dos experimentos estão representados na Tabela 2.10.

Tabela 2.10 - Resultados dos experimentos que compararam diferentes tipos de catalisador

Catalisador utilizado	Rendimento de biochar (%)	Rendimento de bio-óleo (%)	Rendimento de gás de pirólise (%)
Sem catalisador	22,81	59,06	18,13
Li ₂ CO ₃	27,46	46,36	26,18
Na ₂ CO ₃	28,02	42,44	29,54
K ₂ CO ₃	28,1	41,85	30,05
KOH	29,03	40,47	30,5

Fonte: He et al., 2024

2.7.10 Pirólise *in-situ* de palha de soja usando hidróxido de potássio como catalisador

Hu et al., 2022 fizeram a pirólise *in-situ* de palha de soja, usando hidróxido de potássio como catalisador. Os parâmetros usados nos experimentos foram: temperatura em que ocorre a pirólise e quantidade de catalisador usada no processo pirolítico. Para avaliar a influência do catalisador, foram feitos experimentos a uma temperatura de 600 °C. As situações analisadas foram: ausência de catalisador, 1 parte de KOH para 8 partes de biomassa, 1 parte de KOH para 4 partes de biomassa, 1 parte de KOH para 2 partes de biomassa e 1 parte de KOH para 1 parte de biomassa. Para analisar a influência da temperatura, foram feitos experimentos na ausência de catalisador e experimentos usando 1 parte de catalisador para 2 partes de biomassa. As temperaturas analisadas foram 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C e 800 °C. Os rendimentos de carvão, bio-óleo e gás de pirólise para os experimentos que compararam as diferentes proporções de KOH estão representados na Tabela 2.11. Os rendimentos de carvão, bio-óleo e gás de pirólise para os experimentos que compararam as diferentes temperaturas na ausência de catalisador estão representados na Tabela 2.12. Os rendimentos de carvão, bio-óleo e gás de pirólise para os experimentos que compararam as diferentes temperaturas usando uma proporção de 1 parte de KOH para 2 partes de biomassa estão representados na Tabela 2.13.

Hu et al., 2022 também analisaram as composições do gás de pirólise, do bio-óleo e do carvão gerado. Foi possível perceber que o hidróxido de potássio favorece a produção de hidrogênio, visto que a 600 °C a produção de hidrogênio foi de 6 mL/(g de biomassa) na ausência de catalisador, enquanto na presença de 1 parte de catalisador para 2 partes de biomassa a produção de hidrogênio foi de 58 mL/(g de biomassa). As propriedades do carvão

estão representadas na Tabela 2.14 e as propriedades do bio-óleo obtido usando uma proporção de uma parte de catalisador para 2 partes de biomassa a uma temperatura de 600 °C estão representadas na Tabela 2.15. A partir dos dados representados na Tabela 2.15, é possível perceber que a presença de hidróxido de potássio favorece a formação de hidrocarbonetos, o que confere uma maior qualidade ao bio-óleo.

Tabela 2.11 - Resultados dos experimentos que compararam diferentes proporções de KOH

Proporção KOH: biomassa	Rendimento de biochar (%)	Rendimento de bio- óleo (%)	Rendimento de gás de pirólise (%)
Sem KOH	28,90	41,64	29,46
1:8	34,91	30,92	34,18
1:4	36,13	23,76	40,11
1:2	43,21	13,77	43,02
1:1	44,48	12,49	43,03

Fonte: Hu et al., 2022

Tabela 2.12 - Resultados dos experimentos feitos na ausência de catalisador

Temperatura (°C)	Rendimento de biochar (%)	Rendimento de bio- óleo (%)	Rendimento de gás de pirólise (%)
400	35,88	29,46	34,66
500	27,82	37,67	34,51
600	28,90	41,64	29,46
700	25,55	32,36	42,09
800	24,21	26,53	49,25

Fonte: Hu et al., 2022

Tabela 2.13 - Resultados dos ensaios feitos a diferentes temperaturas na presença de KOH

Temperatura (°C)	Rendimento de biochar (%)	Rendimento de bio- óleo (%)	Rendimento de gás de pirólise (%)
400	48,92	8,92	42,16
500	40,41	13,43	46,15
600	43,21	13,77	43,02
700	40,19	10,34	49,47
800	36,82	10,60	52,58

Fonte: Hu et al., 2022

Tabela 2.14 - Qualidade do carvão gerado a 600 °C a diferentes proporções de catalisadores

KOH: biomasssa	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
0:1	62,47	3,89	4,85	0,05	28,74
1:8	52,82	3,81	3,89	0,31	39,17
1:4	48,60	3,64	3,31	0,03	44,42
1:2	40,79	2,69	3,03	0,27	53,22
1:1	41,36	3,83	2,93	0,10	51,78

Fonte: Hu et al., 2022

Tabela 2.15 - Composição mássica do bio-óleo produzido na ausência e na presença de KOH

KOH: biomasssa	Ésteres (%)	Fenóis (%)	Aldeídos (%)	Cetonas (%)	Ácidos carboxílicos (%)	Furanos (%)	Compostos nitrogenados (%)	Hidrocarbonetos (%)
0:1	27,31	23,79	9,38	10,93	7,93	7,62	2,71	10,36
1:2	27,24	41,95	1,55	7,23	0	1,44	4,51	16,38

Fonte: Hu et al., 2022

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Obtenção da casca do fruto de jatobá

Primeiramente, foi realizada a coleta dos frutos do jatobá. Depois da coleta, os frutos foram quebrados usando um martelo e a casca foi separada da farinha e da semente. Após essa separação da casca da polpa, os fragmentos da casca de jatobá foram lavados para separar a casca de restos da polpa que possam ter ficado junto da casca. Os frutos do jatobá foram colhidos no Bosque do Jatobá em Uberlândia. (Bosque do Jatobá, 2025).

3.2 Moagem da casca do jatobá

Após a obtenção da casca, foi feito o processo de moagem da casca do jatobá usando um moinho de facas fabricado pela SP Labor - Equipamentos e Acessórios para Laboratórios, representado na Figura 3.1, com o intuito de obter partículas com granulometrias menores.

Figura 3.1 - Moinho de facas usado para moer a casca do fruto do jatobá



Fonte: autoria própria

3.3 Peneiramento

Após a moagem, as partículas da casca de jatobá foram separadas de acordo com sua granulometria, usando peneiras fabricadas pela BERTEL Indústria Metalúrgica Ltda. e um agitador de peneiras da marca Retsch. As peneiras escolhidas foram a peneira de 42 mesh, de 60 mesh, de 80 mesh, de 150 mesh e uma peneira cega. O tempo em que o agitador das peneiras ficou ligado foi de 5 minutos. A peneira de 42 mesh possui um diâmetro de abertura de 355 μm ,

a peneira de 60 mesh possui uma abertura de 250 μm , a peneira de 80 mesh possui uma abertura de 180 μm e a peneira de 150 mesh possui um diâmetro de abertura de 106 μm . O conjunto de peneiras e o agitador montados estão representados na Figura 3.2 (Prolab, 2026).

Figura 3.2 - Conjunto de peneiras e agitador montado



Fonte: autoria própria

As partículas que ficaram retidas nas peneiras de 42 mesh e de 80 mesh retornaram para o moinho. As partículas que ficaram retidas nas peneiras de 60 mesh e 150 mesh foram separadas para serem usadas nos processos de pirólise e análise, e as partículas que passaram pela peneira de 150 mesh foram descartadas.

3.4 Análise imediata da casca do fruto do jatobá

A análise imediata consiste na determinação do teor de umidade, voláteis e cinzas. Essas determinações são feitas com o intuito de fazer a caracterização da biomassa utilizada, nesse caso a casca do fruto do jatobá, os testes de análise imediata seguiram a metodologia recomendada pela ASTM (Cavallaro, 2025).

Para fazer a determinação do teor de umidade da casca de jatobá, foram selecionadas as partículas que ficaram retidas na peneira de 150 mesh. A biomassa foi colada em um cadinho de porcelana previamente pesado. A alíquota da biomassa utilizada foi de $2,0 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$. O cadinho com a biomassa foi colocado em uma estufa fabricada pela Ethik Technology - Equipamentos para Laboratórios a uma temperatura de 105 °C por um período de 24 h. A umidade presente na amostra foi calculada de acordo com a Equação 3.1. Essa análise foi feita em triplicata (ASTM International, 1998a).

$$U(\%) = B(\%) = \frac{(m_{ci} - m_{cs})}{(m_{ci} - m_c)} * 100 \% \quad (3.1)$$

Após o processo de determinação de umidade na biomassa, foi feita a determinação do teor de voláteis. Para fazer esse teste, o cadinho com a casca de jatobá foi tampado e colocado em uma mufla W-One 220 V fabricada pela EDG a uma temperatura de $950^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$. O cadinho com a biomassa permaneceu na mufla por um período de 7 minutos. Após esse período, o cadinho ficou resfriando dentro de um dessecador com sílica gel com o intuito de evitar que a amostra absorvesse a umidade do ar, assim interferindo no resultado do experimento. Por último, o cadinho foi pesado e assim a massa do material restante foi calculada pela diferença entre a massa total e a massa inicial do cadinho. As equações usadas para esse cálculo são: a Equação 3.2, Equação 3.3 e Equação 3.4. Esse experimento foi feito em triplicata (ASTM International, 1998b).

$$m_p(\%) = A(\%) = \frac{(m_{ci} - m_v)}{(m_{ci} - m_c)} * 100 \% \quad (3.2)$$

$$V_{BU}(\%) = A(\%) - B(\%) \quad (3.3)$$

$$V_{BS}(\%) = \frac{(m_{cs} - m_v)}{(m_{cs} - m_c)} * 100 \% \quad (3.4)$$

Após a determinação do teor de voláteis foi feita após a determinação de cinzas, para fazer a determinação do teor de cinzas os cadinhos com o material restante do processo de análise de voláteis foram colocados de volta na mufla a uma temperatura entre 580°C e 600°C por um período de 4 horas, após isso o conjunto cadinho e cinzas ficou esfriando em um dessecador com sílica gel e por último foi pesado e o teor de cinzas foi obtida e a partir da Equação 3.5 e da Equação 3.6 a porcentagem de cinzas foi obtida (ASTM International, 2001). Assim como o teste de umidade e voláteis, o teste de cinzas foi feito em triplicata.

$$C_{iBU}(\%) = \frac{m_{cc}}{m_{ci} - m_c} * 100 \% \quad (3.5)$$

$$C_{iBS}(\%) = \frac{m_{cc}}{m_{cs} - m_c} * 100 \% \quad (3.6)$$

Após a realização desses testes, foi feito o cálculo do carbono fixo, esse cálculo foi feito a partir da Equação 3.7. O carbono fixo foi calculado em base seca (Cavallaro, 2025).

$$C_F(\%) = 100 - C_{iBS}(\%) - V_{BS}(\%) \quad (3.7)$$

3.5 Determinação da composição elementar de C, H e O

Primeiramente foi feita a determinação das porções de carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O). A determinação das frações desses elementos é importante para caracterizar e conhecer os processos de conversão termoquímica, como por exemplo a pirólise, a combustão e a gaseificação. Esses dados dão a possibilidade de avaliar o potencial energético da biomassa, visto que esses elementos interferem diretamente no valor do poder calorífico superior e inferior. Vale citar que a determinação das frações de oxigênio, hidrogênio e carbono ajuda a otimizar processos de conversão da biomassa em produtos de maior valor agregado, como por exemplo, biocombustíveis e produtos químicos (Cavallaro, 2025; Nhuchhen, 2016; Parikh; Channiwala; Ghosal, 2007; Shen et al., 2010).

Há três formas de se determinar a composição elementar empiricamente, dentre elas estão as equações de Parikh, de Shen e de Nhuchhen (Nhuchhen, 2016; Parikh; Channiwala; Ghosal, 2007; Shen et al., 2010).

As equações para determinar as porcentagens de C, H e O propostas por Parikh; Channiwala; Ghosal, 2007 são a Equação 3.8, a Equação 3.9 e a Equação 3.10.

$$C(\%) = 0,637 * C_F(\%) + 0,455 * V_{BS}(\%) \quad (3.8)$$

$$H(\%) = 0,052 * C_F(\%) + 0,062 * V_{BS}(\%) \quad (3.9)$$

$$O(\%) = 0,304 * C_F(\%) + 0,476 * V_{bs}(\%) \quad (3.10)$$

As equações para determinar as porcentagens de C, H e O propostas por Nhuchhen, 2016, são a Equação 3.11, a Equação 3.12 e a Equação 3.13.

$$C(\%) = -35,9972 + 0,7698 * V_{BS}(\%) + 1,3269 * C_F(\%) + 0,3250 * C_{iBS}(\%) \quad (3.11)$$

$$H(\%) = 55,3678 - 0,4830 * V_{BS}(\%) - 0,5319 * C_F(\%) - 0,5600 * C_{iBS}(\%) \quad (3.12)$$

$$O(\%) = 223,6805 - 1,7226 * V_{BS}(\%) - 2,2296 * C_F(\%) - 2,2463 * C_{iBS}(\%) \quad (3.13)$$

As equações para determinar as porcentagens de C, H e O propostas por Shen et al., 2010, são a Equação 3.14, a Equação 3.15 e a Equação 3.16.

$$C(\%) = 0,635 * C_F(\%) + 0,460 * V_{BS}(\%) - 0,095 * C_{iBS} \quad (3.14)$$

$$H(\%) = 0,059 * C_F(\%) + 0,060 * V_{BS}(\%) + 0,010 * C_{iBS} \quad (3.15)$$

$$O(\%) = 0,340 * C_F(\%) + 0,469 * V_{bs}(\%) - 0,023 * C_{iBS} \quad (3.16)$$

3.6 Cálculo do poder calorífico superior e inferior da casca do fruto do jatobá

O poder calorífico de uma biomassa mede quanta energia é liberada durante sua combustão completa. A partir desse parâmetro, é possível avaliar o potencial energético da biomassa e se é viável utilizá-la como fonte de energia. Existem duas formas de se medir o poder calorífico, que são o PCS (poder calorífico superior) e o PCI (poder calorífico inferior). O poder calorífico superior leva em consideração a energia liberada pela condensação da água que é formada durante o processo de combustão, enquanto o poder calorífico inferior desconsidera essa energia liberada pela condensação da água. A determinação do poder calorífico superior e inferior é importante no projeto de sistemas de conversão energética e para fazer comparações de diferentes tipos de biomassa. Quanto menor for a proporção de hidrogênio (H) e oxigênio (O) em relação ao carbono (C), maior será o valor energético do material estudado, pois as ligações C-C são mais energéticas do que as ligações C-O e C-H (Cavallaro, 2025; Ries et al., 2021).

A determinação do valor do PCS pode ser feita através de calorimetria, utilizando uma bomba calorimétrica, ou pode ser determinado a partir da composição elementar do combustível. Há na literatura várias correlações para estimativa do PCS, utilizando como base a composição elementar do combustível (Cavallaro, 2025).

A equação que será usada para calcular o poder calorífico superior (PCS) será a Equação de Parikh, representada pela Equação 3.17. Essa equação é amplamente usada para calcular o PCS devido à sua simplicidade e praticidade. Essa equação assume que os elementos químicos interagem de forma linear e não interferem de forma complexa. Essa equação não deve ser usada quando a interação entre elementos químicos ou presença de minerais ou compostos voláteis tem impacto significativo. A Equação 3.17 fornece o poder calorífico em MJ/kg (Cavallaro, 2025; Channiwala; Parikh, 2002; Parikh; Channiwala; Ghosal, 2005).

$$\text{PCS} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = 0,3536 * C_F(\%) + 0,1559 * V_{BS}(\%) - 0,0078 * C_{iBS}(\%) \quad (3.17)$$

O cálculo do PCI será feito a partir da Equação 3.18 (Barbosa et al., 2021; Marafon et al., 2016).

$$\text{PCI} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) = \text{PCS} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) - 600 * \left(9 * \frac{H}{100} \right) \quad (3.18)$$

3.7 Classificação atômica através do uso do Diagrama de van Krevelen

A classificação atômica com base na razão atômica é um meio essencial para analisar o poder calorífico de um combustível. O poder calorífico efetivo aumenta quando o valor das razões hidrogênio/carbono (H/C) e oxigênio/carbono (O/C) diminuem. Isso é possível perceber pelo diagrama de van Krevelen, representado pelo gráfico (Basu, 2010; Cavallaro, 2025).

A análise do diagrama de van Krevelen é feita com o combustível seco (livre de umidade). Quanto mais próximo o combustível estiver do antracito, maior será seu poder calorífico, em outras palavras, quanto mais próximo da origem do gráfico estiver o ponto que representa a razão hidrogênio/carbono (H/C) e oxigênio/carbono (O/C) do combustível, maior será seu poder calorífico (Basu, 2010; Cavallaro, 2025; Santos, 2023). O uso do diagrama de van Krevelen é de suma importância quando se quer submeter uma nova biomassa a um processo termoquímico como pirólise ou gaseificação. As razões atômicas irão dizer qual o potencial de uma biomassa para ser submetida a um processo termoquímico (Basu, 2010).

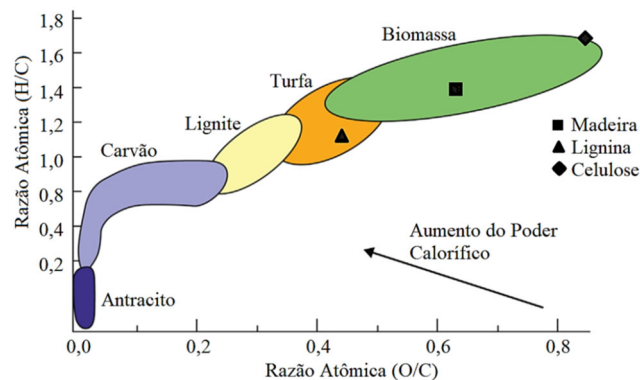
A razão hidrogênio/carbono (H/C) e oxigênio/carbono (O/C) podem ser calculadas pela Equação 3.19 e Equação 3.20, respectivamente (Cavallaro, 2025).

$$\left(\frac{H}{C}\right) = \frac{H(\%)}{C(\%)/12} \quad (3.19)$$

$$\left(\frac{O}{C}\right) = \frac{O(\%)/16}{C(\%)/12} \quad (3.20)$$

O diagrama de van Krevelen está representado na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Diagrama de van Krevelen

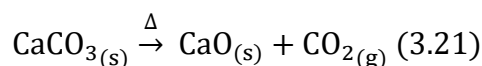


Fonte: Cavallaro, 2025

3.8 Preparação dos catalisadores usados

3.8.1 Óxido de cálcio

O óxido de cálcio (CaO) utilizado nos experimentos (representado na Figura 3.4) será preparado a partir da calcinação do carbonato de cálcio (CaCO₃). Nesse processo, o carbonato de cálcio ou o calcário é decomposto em dióxido de carbono (CO₂) e óxido de cálcio. Para realizar o processo de calcinação, o carbonato de cálcio é submetido a uma temperatura de 850 °C ou superior, por um período de horas, tendo em vista que o carbonato de cálcio se decompõe acima de 825 °C. O processo de decomposição do carbonato de cálcio está representado pela Equação 3.21 (Escardino et al., 2010; Young, 2007).



Para preparar o óxido de cálcio usado no experimento, primeiramente, foi separada uma massa de 10 g de CaCO₃ P.A. em cadinhos de porcelana. Após a pesagem, o carbonato de cálcio foi seco em uma estufa com circulação forçada a uma temperatura de 105 °C, por um período de 24 h. Após esse período, o cadinho foi posto para esfriar em um dessecador com sílica gel. Depois da secagem o cadinho foi colocado em uma mufla W-One 220 V fabricado pela EDG para fazer o processo de calcinação esse processo foi feito com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e quando a temperatura atingiu 900 °C o cadinho ficou por 1 hora na mufla, após a calcinação o cadinho ficou resfriando na mufla a fim de evitar que o óxido de cálcio absorvesse umidade e formasse hidróxido de cálcio, processo esse que está representado na Equação 3.22 e após esse processo o óxido de cálcio foi posto em um recipiente hermético até sua utilização para evitar que formasse o hidróxido de cálcio a partir da reação entre o óxido de cálcio e a umidade do ar e a formação de carbonato de cálcio a partir da reação com o entre o dióxido de carbono e o hidróxido de cálcio formado quando houve a absorção da umidade do ar, reação essa representada pela Equação 3.23 (Cavallaro, 2025; Collie, 1976; Dostie; Rausis; Power, 2024).

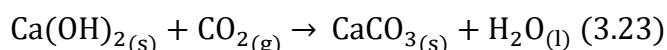
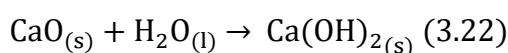


Figura 3.4 - Óxido de cálcio usado no experimento



Fonte: autoria própria

3.8.2 Resíduo da mineração de fosfato

O preparo do resíduo de mineração de fosfato foi feito aquecendo 10 g de apatita a 105 °C em uma estufa com circulação forçada, usando um cadinho de porcelana, por um período de 24 horas. Após esse período, o cadinho foi colocado para resfriar em um dessecador com sílica gel. Após a secagem, o cadinho de porcelana com o resíduo foi colado em uma mufla W-One 220 V fabricada pela EDG, programada para aquecer 10 °C/min. Após a temperatura no interior da mufla atingir 900 °C o cadinho foi mantido nessa temperatura por um período de 1 hora e após esse período, o cadinho foi resfriado à temperatura ambiente no interior da mufla a fim de se evitar que a apatita absorvesse umidade do ar. Esse processo é semelhante ao processo de obtenção do óxido de magnésio (MgO) e óxido de cálcio (CaO). A temperatura de 900 °C foi escolhida como temperatura de trabalho com o intuito de diminuir o efeito da sinterização durante o processo, pois acima dessa temperatura ocorre o efeito de sinterização. O resíduo de mineração usado nos experimentos está representado na Figura 3.5 (Cavallaro, 2025; Santos, 2023).

Figura 3.5 - Resíduo de mineração de fosfato usado no experimento



Fonte: autoria própria

3.8.3 Zeólita 3A

O preparo da zeólita 3A se deu primeiramente com sua moagem, que foi feita no moinho de facas representado pela Figura 3.2 e pela Figura 3.3. Após isso, a zeólita foi seca em uma estufa com circulação forçada, por um período de 24 horas e uma temperatura de 105 °C. Após esse processo, uma amostra de 10 g de zeólita foi posta para secar em um dessecador contendo sílica gel. Depois da secagem, foi feito o processo de calcinação em uma mufla W-One 220 V fabricada pela EDG, que foi feito a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e 350 °C. Após atingir essa temperatura, a zeólita permaneceu na mufla por um período de 2 horas. Após esse período, a zeólita ficou esfriando na mufla até atingir a temperatura ambiente, depois de atingir a temperatura ambiente, a zeólita foi transferida para um frasco hermético para ser usada posteriormente. A zeólita antes da moagem está representada na Figura 3.6 e a zeólita moída está representada na Figura 3.7 (Resende; Noronha; Hori, 2020).

Figura 3.6 - Zeólita 3A



Fonte: autoria própria

Figura 3.7 - Zeólita 3A moída

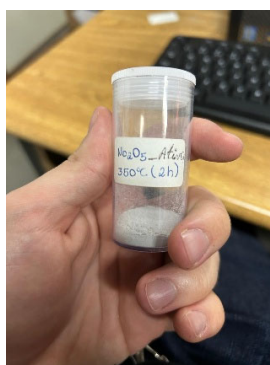


Fonte: autoria própria

3.8.4 Pentóxido de nióbio (Nb_2O_5)

O preparo do pentóxido de nióbio se deu de forma semelhante ao preparo da zeólita 3A. Primeiramente, foi feita a secagem de uma alíquota de 10g de pentóxido de nióbio em uma estufa com circulação forçada por um período de 24 horas e uma temperatura de 105 °C. Após esse período, a amostra foi posta para secar em um dessecador com sílica gel. Após a secagem foi feito o processo de calcinação do pentóxido de nióbio em uma mufla a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min até atingir a temperatura de 350 °C, após atingir essa temperatura, o pentóxido de nióbio foi deixado na mufla por um período de 2 horas e após esse período o Nb_2O_5 permaneceu na mufla por um período suficiente para atingir a temperatura ambiente e depois do resfriamento o pentóxido de nióbio foi transferido para um recipiente hermético para ser usado posteriormente, o pentóxido de nióbio utilizado está representado na Figura 3.8 (Cavallaro, 2025; Resende; Noronha; Hori, 2020).

Figura 3.8 - Pentóxido de nióbio utilizado



Fonte: autoria própria

3.8.5 Hidróxido de potássio

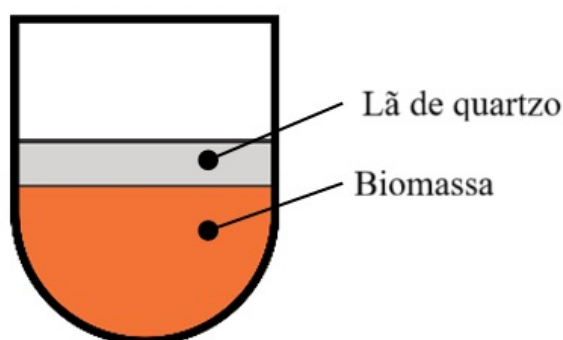
O preparo do hidróxido de potássio se através da secagem de 10 g de hidróxido de potássio fornecido pela Dinâmica Química Contemporânea Ltda., depois essa alíquota foi colocada em uma estufa com circulação forçada por um período de 24 horas e uma temperatura de 105 °C, primeiramente foi feita a secagem de uma alíquota de 10g de hidróxido de potássio em uma estufa com circulação forçada por um período de 24 horas e uma temperatura de 105 °C, depois o hidróxido de potássio foi triturado com auxílio de um almofariz e pistilo, e guardado em um dessecador em um tubo de microcentrífuga.

3.9 Micropirólise associada à cromatografia gasosa

3.9.1 Micropirólise na ausência de catalisadores

Para realizar o teste de micropirólise de biomassa sem os catalisadores, primeiramente foi pesada uma quantidade de 1 mg de biomassa sem catalisador em um cadinho de aço inoxidável com uma haste feita do mesmo material em uma balança com 5 casas decimais de precisão Shimadzu AUW2200, com auxílio de um suporte para cadinho. Após a pesagem, foi colocada uma camada de lã de quartzo fornecida pela Actquarzo – Tecnologia Científica por cima da biomassa. As partículas usadas no teste de micropirólise tinham granulometria de 150 mesh. Após a pesagem, o cadinho com a biomassa foi colocado em um pirolisador Multi-Shot EGA-PY-3030D, fabricado pela Frontier Laboratories. Esse pirolisador foi acoplado a um cromatógrafo gasoso acoplado a um espectrômetro de massas Shimadzu GCMS-QP2020 NX. O esquema de pesagem do cadinho está representado na Figura 3.9. (Cavallaro, 2025).

Figura 3.9 - Esquema de pesagem de um cadinho com biomassa sem catalisador



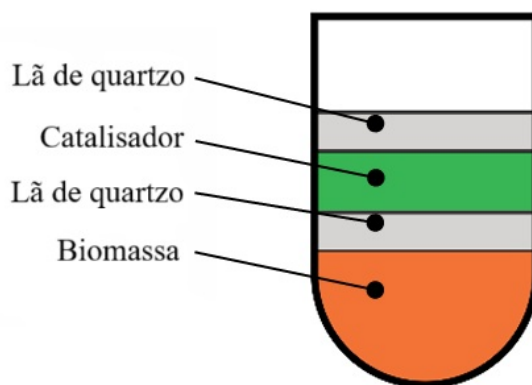
Fonte: Cavallaro, 2025

3.9.2 Micropirólise na presença de catalisadores

Para realizar o teste de micropirólise de biomassa com os catalisadores, primeiramente foi pesada uma quantidade de 1 mg de biomassa sem catalisador em um cadinho de aço inoxidável com uma haste feita do mesmo material, com auxílio de um suporte para cadinho, em uma balança com 5 casas decimais de precisão. Após a pesagem, foi colocada a primeira camada de lã de quartzo por cima da biomassa. Por cima da camada de lã de quartzo foi colocado 1 mg do catalisador utilizado. Por último, foi colocada por cima do catalisador a segunda camada de lã de quartzo. Após a pesagem, o cadinho com a biomassa e o catalisador foi colocado em um pirolisador Multi-Shot EGA-PY-3030D, fabricado pela Frontier

Laboratories. Esse pirolisador foi acoplado a um cromatógrafo a gás acoplado a um espectrômetro de massas Shimadzu GCMS-QP2020 NX. O esquema de pesagem do cadinho está representado na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Esquema de pesagem de um cadinho com biomassa com catalisador

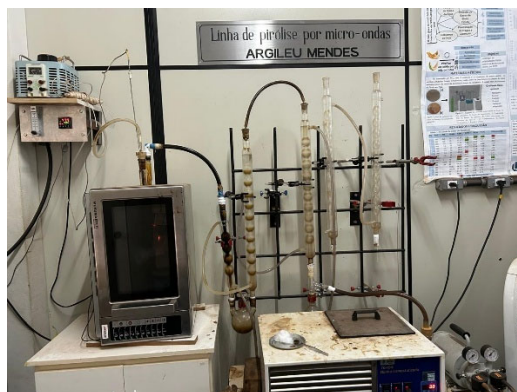


Fonte: Cavallaro, 2025

3.10 Pirólise assistida por micro-ondas

Para realizar os experimentos de pirólise assistida por micro-ondas, foi utilizada a unidade experimental de pirólise por micro-ondas “Argileu Mendes”, localizada no Laboratório de Sistemas Particulados do Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. A unidade de pirólise montada está representada na Figura 3.11. O nome da unidade se deve ao fato de que um estudante da UFU chamado Argileu Mendes propôs em 2018 a montagem de uma unidade de pirólise assistida por micro-ondas com o intuito de continuar o projeto de seu doutorado, porém ele veio a falecer antes de sua montagem e a unidade de pirólise assistida por micro-ondas recebeu seu nome (Cavallaro, 2025).

Figura 3.11 - Unidade experimental de pirólise por micro-ondas “Argileu Mendes”



Fonte: autoria própria

Para realizar esse experimento, uma quantidade de aproximadamente 70 g de casca de jatobá foi colocada dentro do reator de quartzo fundido. Depois disso o reator de quartzo foi colocado em cima de um suporte de vidro dentro do forno de micro-ondas, depois foi colado em uma das bocas do reator de quartzo um tubo que tem um termopar na ponta e que serve para levar o nitrogênio do cilindro para dentro do reator, após isso foi conectada a outra boca do reator ao primeiro condensador, esse primeiro condensador está conectada a um balão de três vias, que está conectada a um segundo condensador que tem em sua extremidade superior um pedaço de algodão previamente pesado, que serve para reter partículas e evitar danos a bomba de vácuo e está conectada a um terceiro condensador, que por fim está conectada a um adaptador de vidro de três vias, que está conectada a um balão de fundo redondo e a uma bomba de vácuo fabricada pela Primatec Equipamentos. Foi colocado um algodão na saída do adaptador de 3 vias também e na saída do kitassato. A bomba de vácuo fornece um vácuo de 100 mmHg. Após montar esse aparato, foi ligada a circulação de água. A temperatura da água é mantida usando um banho termostatizado fabricado pela Tecnal Equipamentos Científicos.

Após montar esse aparato e ligar o sistema de circulação de água, o nitrogênio foi fornecido ao sistema durante um período de 10 minutos e após esse período, o processo de pirólise foi iniciado em seguida e após atingir a temperatura desejada, o tempo do processo foi iniciado. Após finalizado o processo de pirólise, o reator ficou esfriando até ficar abaixo de 100 °C para evitar que o carvão virasse cinzas, além disso foi feita a lavagem do sistema de destilação utilizando álcool etílico 70 % e o bio-óleo misturado com o álcool foi colocado em um becker previamente pesado em uma estufa fabricada pela Marconi Equipamentos a 75 °C para evaporar o álcool e após o álcool evaporar foi feita novamente a pesagem do becker e por

diferença a massa do bio-óleo que tinha no becker foi medida. E o algodão que estava no final do último condensador foi prensado com auxílio de uma seringa para extrair o bio-óleo que estava nele, e esse bio-óleo foi colocado em um tubo de microcentrífuga previamente pesado. O rendimento do bio-óleo foi calculado a partir da massa de biomassa que tinha no começo do experimento, a partir do bio-óleo retido no algodão, do bio-óleo coletado com álcool 70 % e do bio-óleo presente no tubo de microcentrífuga.

3.11 MEV (microscopia eletrônica de varredura)

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica muito útil na análise de superfícies. Um microscópio eletrônico de varredura produz um feixe de elétrons com energia superior a 40 keV, esse feixe é varrido de forma paralela, produzindo linhas paralelas na superfície, com isso são gerados sinais, que são coletados para formar a imagem da superfície sólida. Porém, para que um microscópio eletrônico de varredura funcione, a superfície do sólido analisado deve ser condutora. Caso a superfície seja isolante, será necessário recobrir a superfície do sólido com ouro para que seja possível sua análise (Bogner et al., 2007; De Harven; Leung; Christensen, 1984; Suzuki, 2002).

A microscopia eletrônica de varredura permitiu que fossem analisados o carvão produzido e a biomassa produzida, possibilitando assim uma comparação entre ambos. Para fazer essa análise, foi preciso recobrir a superfície do carvão e da biomassa com ouro, pois suas superfícies não são condutoras. Para fazer isso, foi utilizado um dispositivo de pulverização catódica para revestimento universal em microscopia eletrônica de varredura Leica EM SCD050. E para fazer as imagens da superfície da biomassa e do carvão foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO MA10.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise imediata da casca do fruto do jatobá

A umidade da casca do fruto do jatobá apresentou uma umidade de $8,67\% \pm 0,09\%$, o que a torna adequada para processos termoquímicos, visto que o limite máximo de água recomendado para a utilização da biomassa em processos termoquímicos, que é 10 % de umidade. Quanto maior for a umidade do material, menor será o poder calorífico do bio-óleo produzido (Bridgwater, 2012; Cavallaro, 2025). O valor da umidade da casca do fruto jatobá é baixo comparado com outras biomassas como caroço de pequi (28,56%), casca do fruto do baru (12,02%) e casca do tronco de jatobá (11,56%), resíduo de eucalipto (10,08%), casca do tronco do eucalipto (10,24%), das folhas de eucalipto (9,12%) e dos galhos de eucalipto (10,42%) (Miranda, 2017; Ries et al., 2021).

A casca do fruto do jatobá possui uma fração de voláteis de $80,71\% \pm 2,63\%$ em base seca. A fração de voláteis presentes na casca do fruto do jatobá é parecida com outras biomassas, como por exemplo, o epicarpo da macaúba ($79,65\% \pm 0,17\%$ em base seca), a palha de cana-de-açúcar (81,6% em base seca), caroço de pequi (83,01% em base seca), casca do fruto do baru (71,71% em base seca) e casca do tronco de jatobá (75,36% em base seca) (Almeida, 2008; Cavallaro, 2025; Miranda, 2017). Teores mais altos de voláteis em uma biomassa a tornam mais adequada para a produção de bio-óleo, enquanto teores menores de voláteis a tornam mais adequada para a produção de carvão vegetal (Ries et al., 2021).

O teor de cinzas da casca do fruto de jatobá foi de $1,52\% \pm 0,01\%$ em base seca. Esse teor é baixo em relação à palha de cana-de-açúcar (11,7% em base seca) e à casca do fruto de baru (2,6 % em base seca), e é alto em relação à casca do tronco de jatobá (1,08% em base seca) e ao caroço de pequi (1,22% em base seca) (Almeida, 2008; Miranda, 2017). Com base nisso, o teor de carbono fixo na casca do fruto do jatobá é de $17,77\% \pm 2,63\%$. Os valores do teor de cinzas, voláteis, umidade e carbono fixo estão representados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Análise imediata

Testes	U(%)	V _{BU} (%)	V _{BS} (%)	C _{iBU} (%)	C _{iBS} (%)	C _F (%)
1	8,53	78,62	85,95	1,39	1,52	12,53
2	8,84	70,75	77,61	1,40	1,54	20,85
3	8,64	71,77	78,56	1,37	1,50	19,94
Média	8,67	73,72	80,71	1,39	1,52	17,77
Erro	0,09	2,47	2,63	0,01	0,01	2,63

Fonte: autoria própria

4.2 Determinação da composição elementar, cálculo do PCI e PCS e classificação atômica.

O valor do poder calorífico superior foi de 18,85 MJ/kg $\pm$ 0,52 MJ/kg. O poder calorífico inferior obtido a partir do método de Shen foi de 17,52 MJ/kg $\pm$ 0,52 MJ/kg. Com base no método de Shen, a razão hidrogênio/carbono (H/C) é de 1,47 $\pm$ 0,01 e a razão oxigênio/carbono (O/C) é de 0,68 $\pm$ 0,01.

As composições elementares utilizando o método de Shen, assim como as razões hidrogênio/carbono (H/C) e oxigênio/carbono (O/C) e os valores do PCI, estão representados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Composição elementar encontrada pelo método de Shen

Teste	C(%)	H(%)	O(%)	H/C	O/C	PCI (MJ/kg)
1	47,34	5,91	44,53	1,50	0,71	16,48
2	48,79	5,90	43,45	1,45	0,67	18,13
3	48,66	5,91	43,59	1,46	0,67	17,95
Média	48,27	5,91	43,86	1,47	0,68	17,52
Erro	0,46	0,01	0,34	0,01	0,01	0,52

Fonte: autoria própria

O poder calorífico inferior obtido a partir do método de Parikh foi de 17,52 MJ/kg $\pm$ 0,53 MJ/kg. Com base no método de Parikh, a razão hidrogênio/carbono (H/C) é de 1,48 $\pm$ 0,02 e a razão oxigênio/carbono (O/C) é de 0,68 $\pm$ 0,01. As composições elementares utilizando o método de Parikh, assim como as razões hidrogênio/carbono (H/C) e oxigênio/carbono (O/C) e os valores do PCI, estão representados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Composição elementar encontrada pelo método de Parikh

Teste	C(%)	H(%)	O(%)	H/C	O/C	PCI (MJ/kg)
1	47,09	5,98	44,72	1,52	0,71	16,47
2	48,59	5,90	43,28	1,46	0,67	18,13
3	48,45	5,91	43,46	1,46	0,67	17,95
Média	48,04	5,93	43,82	1,48	0,68	17,52
Erro	0,48	0,03	0,45	0,02	0,01	0,53

Fonte: autoria própria

O poder calorífico inferior obtido a partir do método de Nhuchhen foi de 17,48 MJ/kg $\pm$ 0,55 MJ/kg. Com base no método de Nhuchhen, a razão hidrogênio/carbono (H/C) é de 1,46 $\pm$ 0,08 e a razão oxigênio/carbono (O/C) é de 0,62 $\pm$ 0,04. As composições elementares utilizando o método de Nhuchhen, assim como as razões hidrogênio/carbono (H/C) e oxigênio/carbono (O/C) e os valores do PCI, estão representados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Composição elementar encontrada pelo método de Nhuchhen

Teste	C(%)	H(%)	O(%)	H/C	O/C	PCI (MJ/kg)
1	47,28	6,34	44,27	1,61	0,70	16,39
2	51,91	5,93	40,05	1,37	0,58	18,12
3	51,43	5,98	40,53	1,39	0,59	17,94
Média	50,21	6,08	41,61	1,46	0,62	17,48
Erro	1,47	0,13	1,34	0,08	0,04	0,55

Fonte: autoria própria

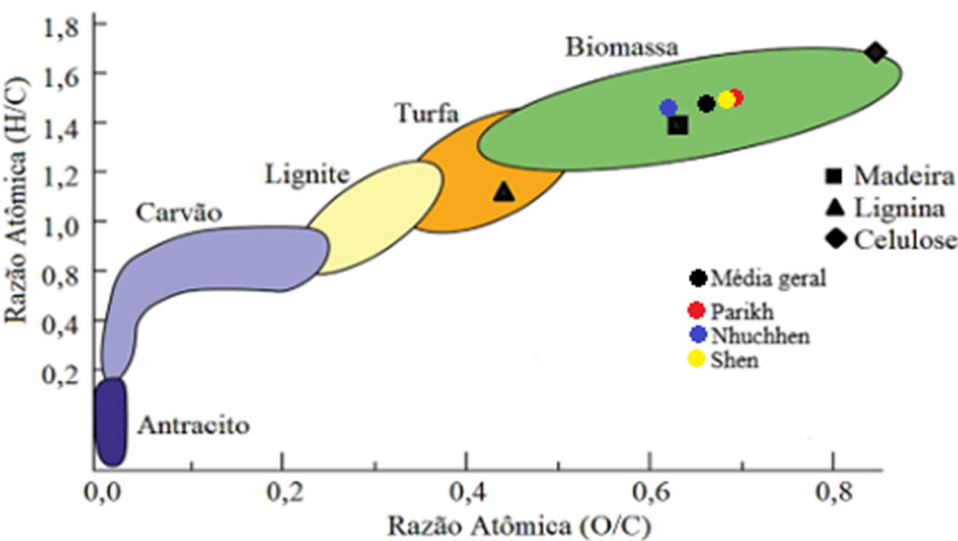
A razão hidrogênio/carbono (H/C) obtida a partir da média dos três métodos foi de 1,47 $\pm$ 0,04, a razão oxigênio/carbono (O/C) obtida foi de 0,66 $\pm$ 0,02 e o PCI obtido foi de 17,51 MJ/kg $\pm$ 0,53 MJ/kg. As composições elementares obtidas a partir da média dos três métodos, assim como as razões hidrogênio/carbono (H/C) e oxigênio/carbono (O/C) e o valor do PCI, estão representados na Tabela 4.5. Isso demonstra que os resultados de PCI e razão hidrogênio/carbono e oxigênio/carbono obtidos a partir dos três métodos foram relativamente próximos, isso também é possível de observar no diagrama de van Krevelen representado na Figura 4.1.

Tabela 4.5 - Composição elementar encontrada pela média da composição dos três métodos

Teste	C(%)	H(%)	O(%)	H/C	O/C	PCI (MJ/kg)
1	47,24	6,08	44,51	1,54	0,71	16,44
2	49,77	5,91	42,26	1,42	0,64	18,12
3	49,51	5,93	42,53	1,44	0,64	17,95
Média	48,84	5,97	43,10	1,47	0,66	17,51
Erro	0,80	0,05	0,71	0,04	0,02	0,53

Fonte: autoria própria

Figura 4.1 - Classificação da casca do fruto do jatobá no diagrama de van Krevelen



Fonte: autoria própria

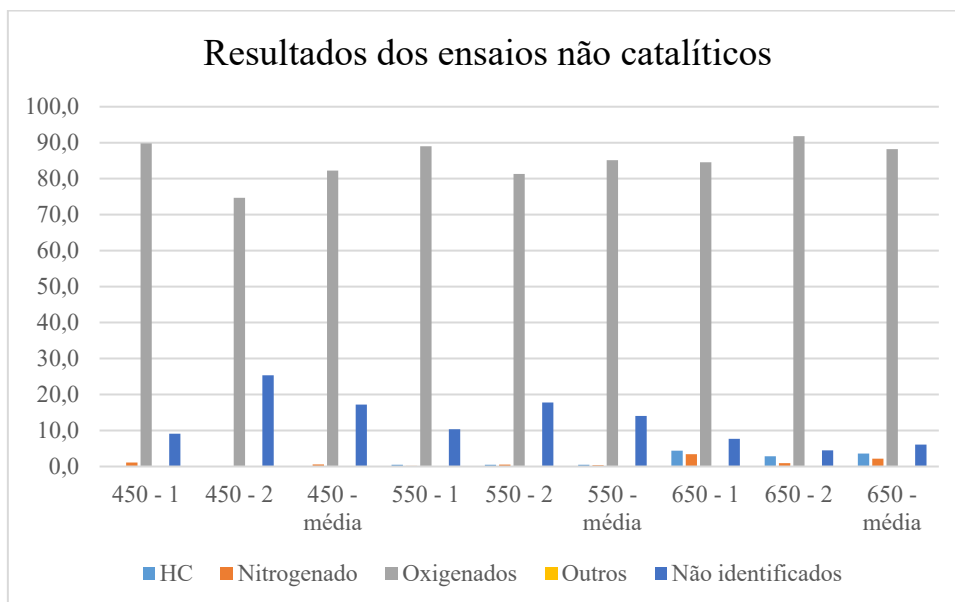
4.3 Micropirólise associada à cromatografia gasosa

4.3.1 Micropirólise associada à cromatografia gasosa na ausência de catalisadores

Os experimentos de micropirólise da casca do fruto do jatobá foram realizados em duplicata, observou-se a partir dos resultados desses experimentos que a fração de hidrocarbonetos nos voláteis aumenta conforme a temperatura aumenta, visto que os experimentos foram feitos a 450 °C, 550 °C e 650 °C e os experimentos realizados a 650 °C foram os que tiveram maior fração de hidrocarbonetos nos voláteis (3,6 % de hidrocarbonetos nos voláteis), os resultados dos ensaios de micropirólise estão representados na Figura 4.2. Esse resultado é esperado visto que Santos et al., 2025 fizeram micropirólise de resíduos de cevada de cervejaria e foi observado o aumento da fração de hidrocarboneto nos voláteis conforme a temperatura aumentava, Santos et al., 2025 realizaram experimentos a 550 °C, 650 °C e 750 °C

e o experimento realizado a 750 °C foi o que obteve melhor resultado, visto que nesse experimento a fração de hidrocarbonetos nos voláteis foi de 19 %, enquanto nos experimentos realizados a 550 °C e 650 °C as frações de hidrocarbonetos foram de 2 % e 4 % respectivamente.

Figura 4.2 - Resultados dos experimentos de micropirólise na ausência de catalisadores



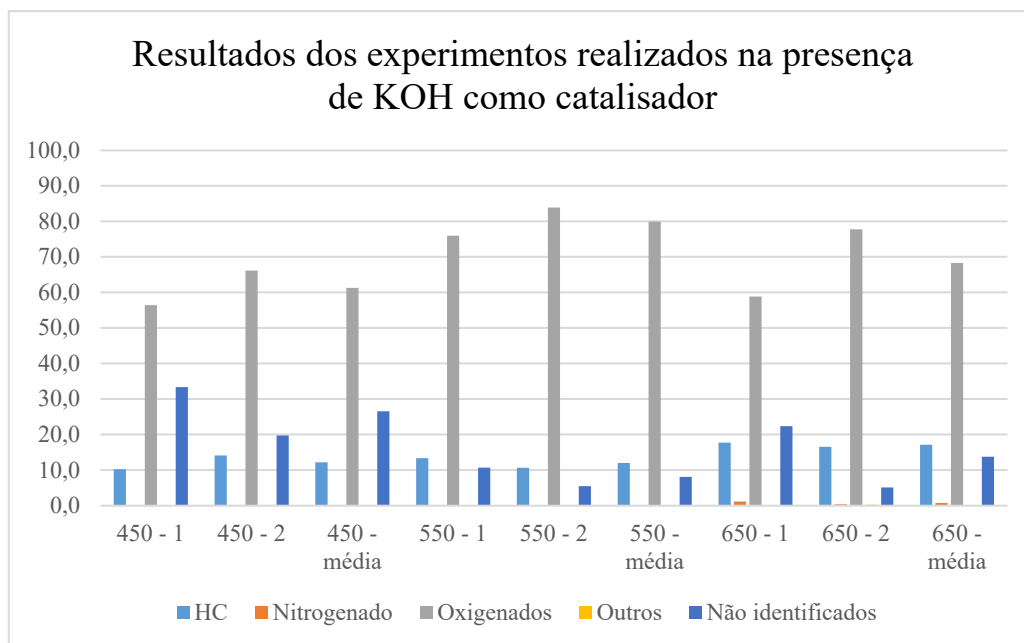
Fonte: autoria própria

4.3.2 Micropirólise associada à cromatografia gasosa na presença de catalisadores

A fração de hidrocarbonetos nos voláteis nos experimentos usando catalisadores alcalinos é maior do que em outros catalisadores, por esta razão a fração de hidrocarbonetos usando CaO e KOH como catalisadores foi maior. Isso se deve ao fato de bases favorecerem reações como a descarboxilização e a descarboxilização cetônica, fazendo com que a fração de hidrocarbonetos nos voláteis aumente (Renz, 2005). Diferente dos testes sem catalisador, a maioria dos testes não seguiu a mesma tendência de aumento da fração de hidrocarbonetos nos voláteis conforme a temperatura aumenta, porém essa tendência foi observada nos testes utilizando pentóxido de nióbio e óxido de cálcio.

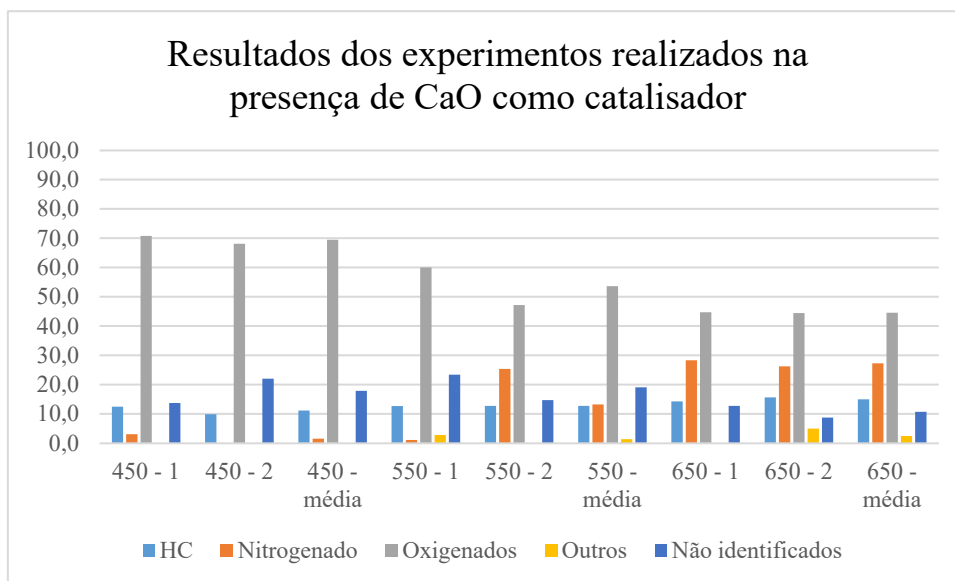
Os testes que foram observados os melhores resultados foram os testes usando KOH e CaO como catalisador, todos a 650 °C. Os testes usando CaO como catalisador obtiveram uma média de 15 % na fração de hidrocarbonetos voláteis, enquanto os testes usando KOH a fração média de voláteis foi de 17,1 %. Os resultados dos testes usando hidróxido de potássio estão representados na Figura 4.3 e os resultados dos testes usando CaO como catalisador estão representados na Figura 4.4.

Figura 4.3 - Resultados dos experimentos de micropirólise na presença de KOH



Fonte: autoria própria

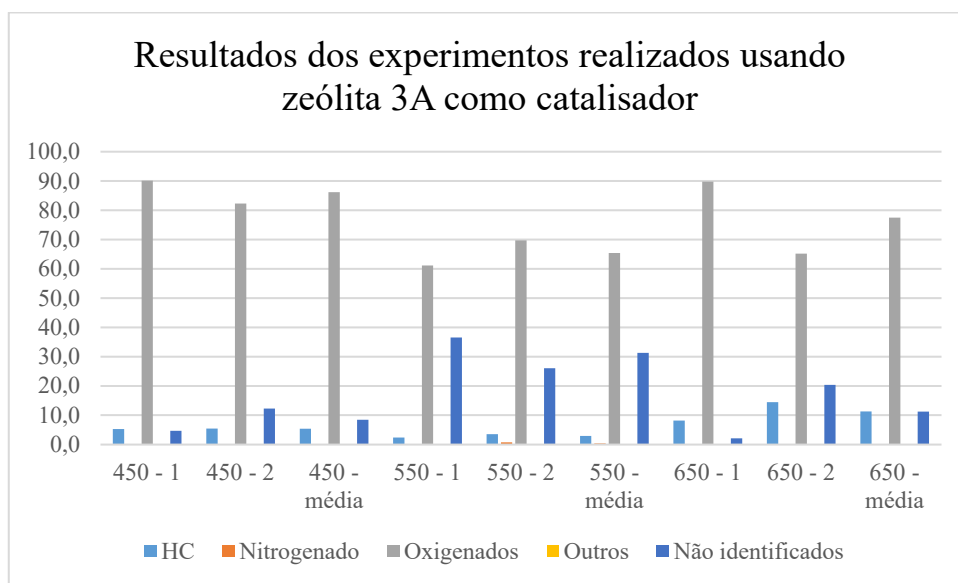
Figura 4.4 - Resultados dos experimentos de micropirólise na presença de CaO



Fonte: autoria própria

Os testes envolvendo a zeólita 3A que apresentaram o melhor resultado foram os testes realizados a 650 °C, o resultado médio do teor de hidrocarboneto nos voláteis desses testes foi de 11,3 %, o que é interessante, visto que zeólitas são amplamente usadas como catalisadores industriais (Pujadó et al., 1992). Os resultados dos testes usando zeólita 3A estão representados na Figura 4.5.

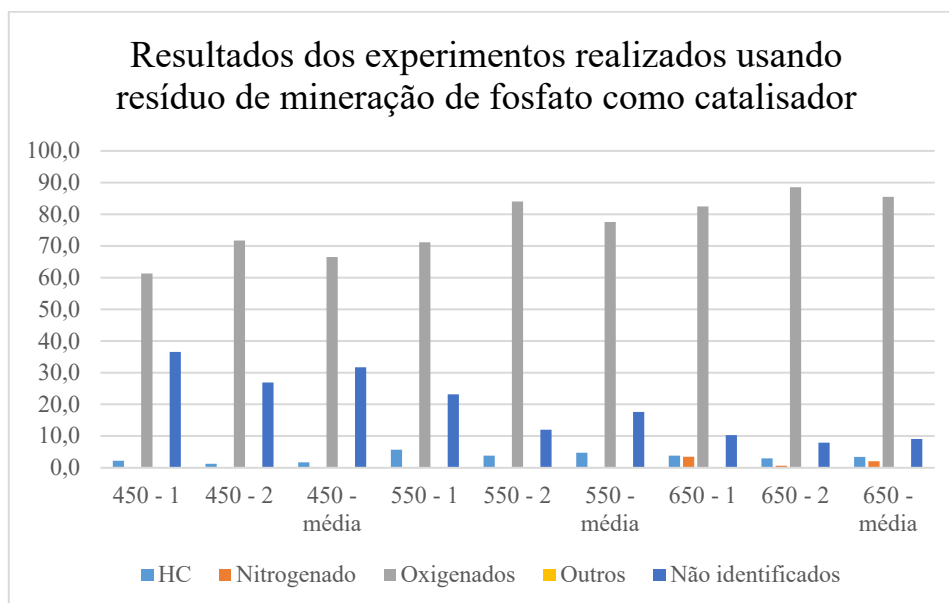
Figura 4.5 - Resultados dos experimentos de micropirólise na presença de zeólita 3A



Fonte: autoria própria

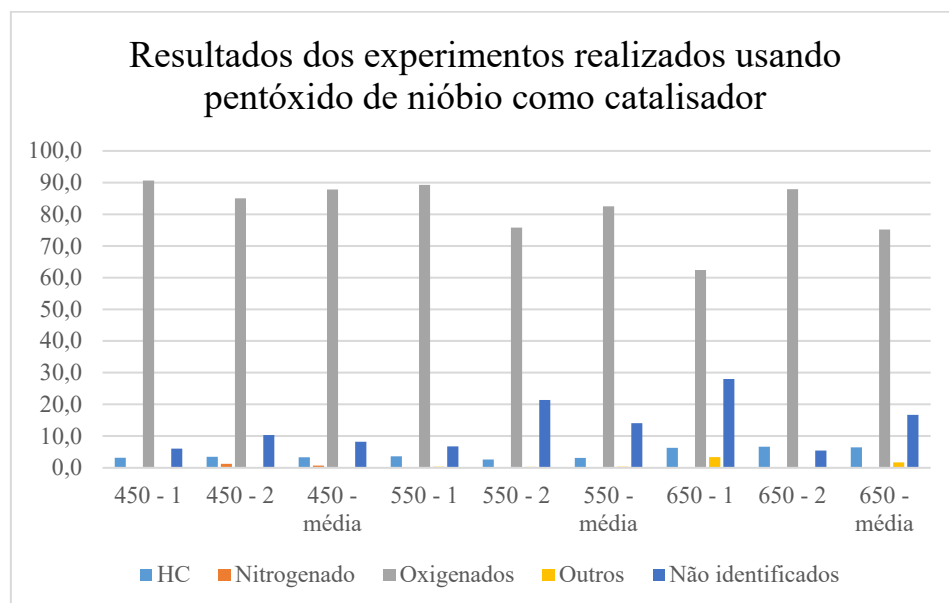
Os testes envolvendo a utilizando o pentóxido de nióbio e resíduo de mineração de fosfato foram os menos atrativos no sentido de aumentar a fração de hidrocarbonetos nos voláteis, visto que esses testes apresentaram a menor fração de hidrocarbonetos nos voláteis produzidos, já que a maior fração de hidrocarbonetos utilizando resíduo de mineração de fosfato foi observada a 550 °C, e a fração média de hidrocarbonetos nos voláteis foi de 4,7 %, enquanto utilizando pentóxido de nióbio a maior fração média de voláteis apareceu a 650 °C e seu valor foi de 6,5 %. Os resultados dos testes usando resíduo de mineração de fosfato como catalisador estão representados na Figura 4.6, e os resultados dos testes usando pentóxido de nióbio como catalisador estão representados na Figura 4.7.

Figura 4.6 - Resultados dos experimentos de micropirólise na presença de resíduo de mineração de fosfato



Fonte: autoria própria

Figura 4.7 - Resultados dos experimentos de micropirólise na presença de Nb_2O_5



Fone: autoria própria

4.4 Pirólise assistida por micro-ondas

Os experimentos foram realizados a temperaturas de 451 °C, 480 °C, 550 °C, 620 °C e 649 °C e com as partículas que ficaram retidas na peneira de 150 mesh e nas partículas que

ficaram retidas na peneira de 60 mesh. Também foram realizados em diferentes temperaturas e variando sua duração. A Tabela 4.6 representa as condições em que cada experimento foi realizado, assim como os resultados.

Tabela 4.6 - Condições e resultados de cada experimento

Experimento	Temperatura	Tempo (min)	Granulometria (mm)	Rendimento do carvão (%)	Rendimento do bio-óleo (%)	Rendimento do gás (%)
1	480	13,7	0,355-0,25	30,00	11,06	58,93
2	480	31,3	0,355-0,25	26,66	15,19	58,15
3	620	13,7	0,355-0,25	28,77	16,05	55,18
4	620	31,3	0,355-0,25	24,01	14,99	61,00
5	550	22,5	0,355-0,25	24,80	16,49	58,72
6	550	22,5	0,355-0,25	26,10	22,20	51,70
7	451	22,5	0,355-0,25	29,87	16,26	54,04
8	649	22,5	0,355-0,25	25,26	15,85	61,31
9	550	10,1	0,355-0,25	27,53	17,51	54,96
10	550	34,9	0,355-0,25	34,09	14,29	51,62
11	480	13,7	0,18-0,106	25,76	34,19	40,05
12	480	31,3	0,18-0,106	19,64	39,14	41,22
13	620	13,7	0,18-0,106	23,80	39,39	36,81
14	620	31,3	0,18-0,106	23,77	56,56	19,67
15	550	22,5	0,18-0,106	20,60	55,90	23,51
16	550	22,5	0,18-0,106	21,40	54,78	23,82
17	451	22,5	0,18-0,106	23,05	30,59	46,36
18	649	22,5	0,18-0,106	24,59	47,23	28,17
19	550	10,1	0,18-0,106	24,80	49,87	25,33
20	550	34,9	0,18-0,106	23,28	57,77	18,95

Fonte: autoria própria

Foi observado que os maiores rendimentos para a obtenção de bio-óleo ocorreram com o uso das partículas com diâmetro entre 0,106 mm e 0,180 mm. Enquanto as partículas com diâmetro entre 0,250 mm e 0,355 mm apresentaram rendimento maior para a obtenção de carvão. O melhor rendimento na obtenção de bio-óleo ocorre em temperaturas entre 550 °C e 620 °C, visto que os melhores resultados foram observados nos experimentos 14, 15 e 20, que foram realizados a 620 °C, 550 °C e 550 °C, vale ressaltar que maiores tempos de duração do experimento favorecem a formação de bio-óleo, visto que os experimentos 14, 15 e 20 duraram respectivamente 31,3 min; 22,5 min e 34,9 min. O melhor rendimento na obtenção de carvão ocorre em temperaturas entre 451 °C e 550 °C, visto que os melhores resultados para a obtenção de carvão ocorreram nos experimentos 1, 7 e 10, realizados a 480 °C, 451 °C e 550 °C

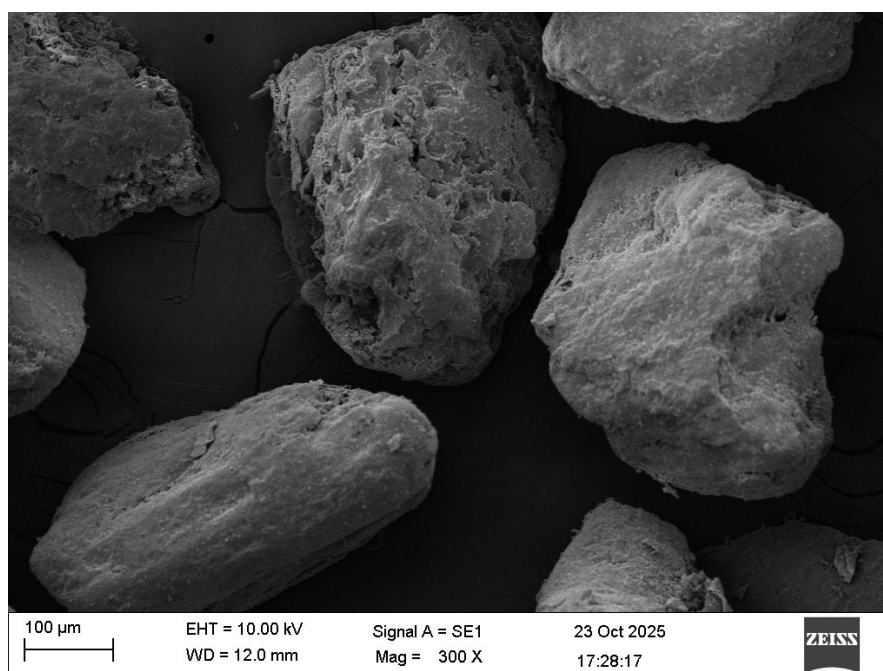
respectivamente. Enquanto o tempo de duração desses experimentos foi de 13,7 min, 22,5 min e 34,9 min, a partir disso é possível afirmar que o que mais interfere no rendimento do carvão não é o tempo e sim a temperatura. Temperaturas intermediárias para baixo favorecem a formação de carvão.

4.5 MEV

Para fazer a análise da superfície da casca do fruto do jatobá, assim como a superfície do carvão produzido no experimento 10, foi utilizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV). O carvão produzido no experimento 10 foi escolhido, pois esse experimento apresentou o melhor rendimento de carvão. A partir das imagens produzidas por microscopia eletrônica de varredura, é possível perceber que o carvão produzido possui uma superfície mais irregular e porosa que a biomassa.

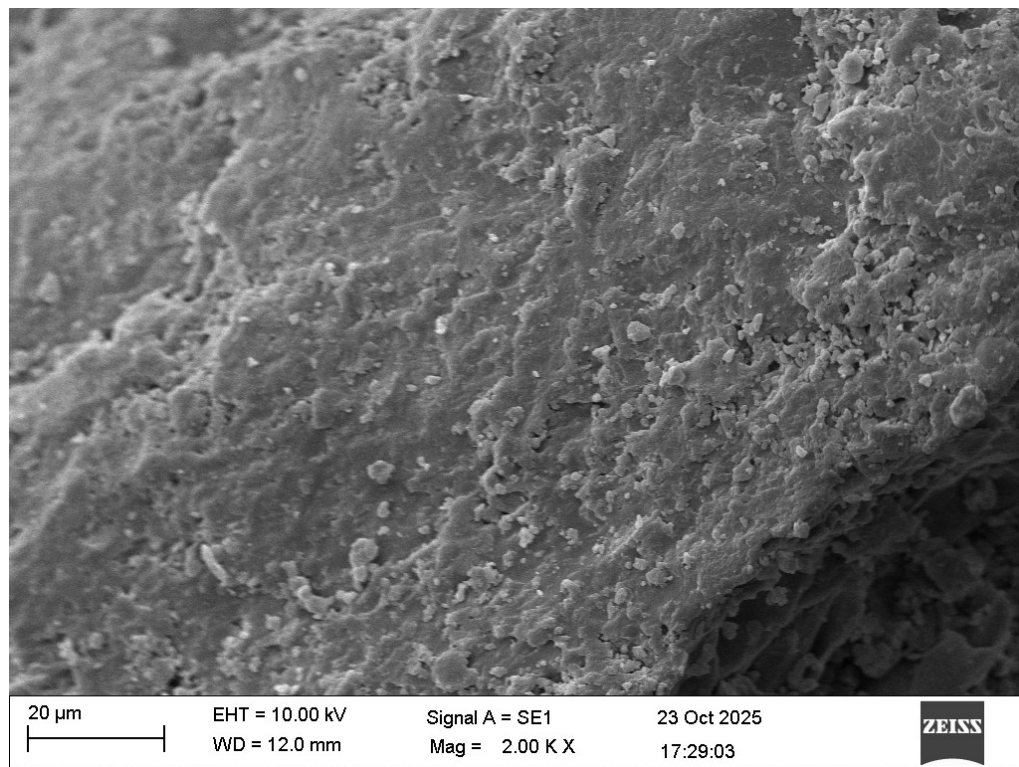
Nas imagens obtidas, não são observadas linhas que indicam a presença de fibras. Também foi possível notar que o carvão é bem mais poroso que a biomassa de origem, embora na superfície da casca do fruto do jatobá também tenha poros que podem influenciar significativamente a propriedade do carvão produzido. O diâmetro dos poros do carvão, em geral, é menor que 20 μm . A Figura 4.8 e a Figura 4.9 representam a superfície da biomassa in natura e a Figura 4.10 e a Figura 4.11 representam a superfície do carvão produzido.

Figura 4.8 - Superfície da biomassa observada com um aumento de 300 vezes



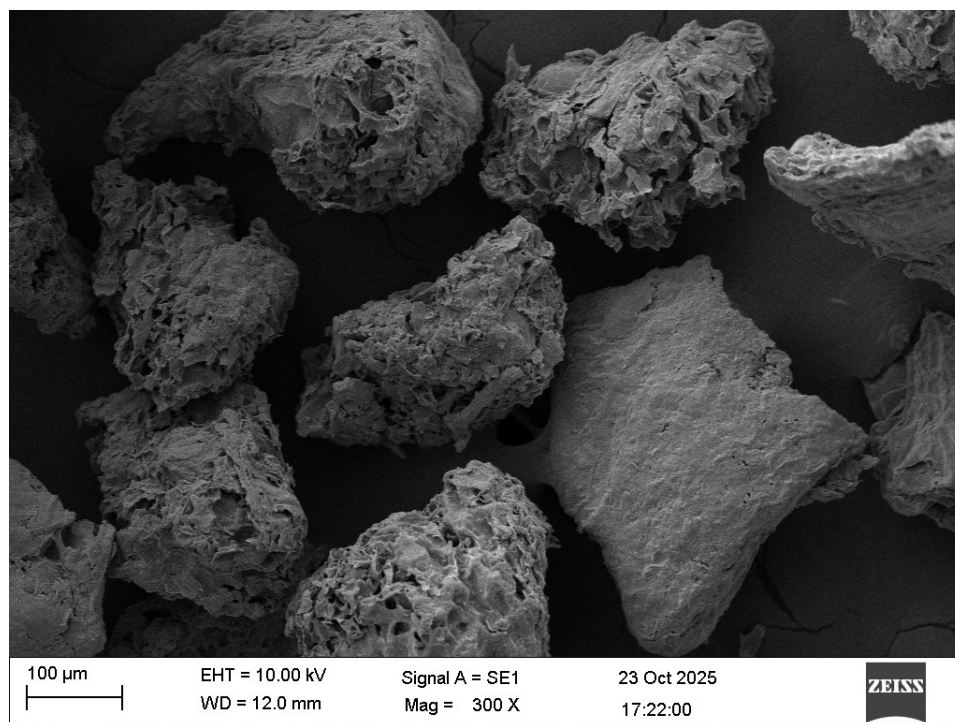
Fonte: autoria própria

Figura 4.9 - Superfície da biomassa observada com um aumento de 2000 vezes



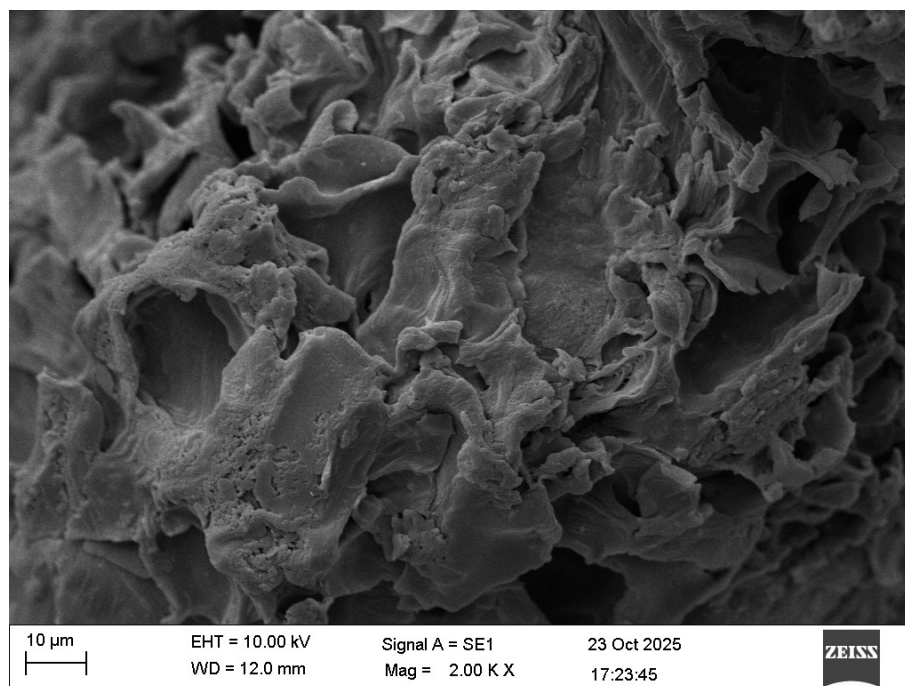
Fonte: autoria própria

Figura 4.10 - Superfície da biomassa observada com um aumento de 300 vezes



Fonte: autoria própria

Figura 4.11 - Superfície da biomassa observada com um aumento de 2000 vezes



Fonte: autoria própria

5. CONCLUSÃO

Esse trabalho demonstrou que é viável a obtenção de carvão e bio-óleo a partir da casca do fruto do jatobá. O fato de a umidade da casca ser inferior a 10 % a torna adequada para seu uso em processos termoquímicos como pirólise e gaseificação, visto que o valor de sua umidade da casca do fruto do jatobá é $8,67 \% \pm 0,09 \%$. Vale ressaltar também que o teor de cinzas da casca do fruto do jatobá em base seca foi de $1,52\% \pm 0,01\%$, que é um teor de cinzas relativamente baixo, comparado a outras biomassas como cana de açúcar (11,2 % em base seca) e a casca do fruto de baru (2,6 % em base seca), e alto em relação à casca do tronco de jatobá (1,08% em base seca) e ao caroço de pequi (1,22% em base seca). Um teor de cinzas menor torna o poder calorífico da biomassa maior, enquanto teores maiores de cinzas tornam o carvão produzido a partir dessa biomassa melhor para ser utilizado como fertilizante (Almeida, 2008; Domingues et al., 2017; Lieskovský et al., 2017; Miranda, 2017).

Foi possível também perceber que os catalisadores alcalinos foram os que mais favoreceram a formação de hidrocarbonetos durante o processo de micropirólise, o que é um resultado interessante dado o baixo custo de catalisadores como óxido de cálcio e hidróxido de potássio em comparação ao pentóxido de nióbio e às zeólitas. O alto teor de hidrocarbonetos nos voláteis quando foi feito o processo de micropirólise na presença de catalisadores básicos se deve ao fato de que catalisadores alcalinos favorecem reações como a descarboxilação (Renz, 2005).

O teor de voláteis na casca do fruto do jatobá foi de $80,71\% \pm 2,63\%$. O teor alto de voláteis na casca do fruto do jatobá favorece a formação de bio-óleo, pois biomassas com alto teor de voláteis são interessantes para processos de pirólise que visam a produção de bio-óleo. Isso foi perceptível nos experimentos, pois o maior rendimento foi de 57,77 %. Tal rendimento foi observado no experimento 20, que foi realizado a 550 °C e sua duração foi de 34,9 minutos (Ries et al., 2021).

Durante os experimentos de pirólise assistida por micro-ondas, foi possível observar que as partículas maiores favorecem a formação do carvão vegetal, visto que os experimentos com as partículas que ficaram retidas nas peneiras de 60 mesh obtiveram um rendimento maior na produção de carvão, enquanto as que ficaram retidas nas peneiras de 150 mesh obtiveram um maior rendimento na obtenção de bio-óleo.

Também foi possível observar que temperaturas intermediárias para altas favorecem a formação de bio-óleo, visto que os melhores resultados para a obtenção de bio-óleo foram observados nas temperaturas de 550 °C e 620 °C, e que tempos maiores tendem a favorecer a formação de bio-óleo. Vale ressaltar que temperaturas intermediárias para baixas favorecem a formação de carvão, visto que os melhores resultados para carvão foram observados a 451 °C, 480 °C e 550 °C, enquanto o tempo não é uma variável tão importante na formação de carbono, visto que esses experimentos duraram 22,5 min; 13,7 min e 34,9 min.

Através das imagens obtidas utilizando microscopia eletrônica de varredura, foi possível observar que a superfície do carvão é bem mais porosa e irregular do que a superfície da casca do fruto do jatobá, o que é possível deduzir que a área superficial é bem maior do que a casca do fruto do jatobá. Com isso, o carvão vegetal produzido tem um grande potencial para ser usado para fabricar carvão ativado.

6. SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS

1) Formas de otimizar o processo de pirólise assistida por micro-ondas:

- Usar um isolante térmico na parte externa dos condensadores para que a água de refrigeração ganhe calor do ambiente e ganhe calor apenas do bio-óleo condensado
- Avaliar se é possível realizar esse processo na ausência de gases inertes.
- Avaliar se secar a biomassa antes do experimento afeta o resultado.
- Usar uma linha de pirólise que permite controlar a taxa de aquecimento.
- Usar um solvente mais volátil, como acetona, para lavar os condensadores.

2) Desenvolvimento de catalisadores:

- Usar o óxido de cálcio proveniente de outras fontes, como conchas de ostra e cascas de ovos, visto que conchas de ostra e cascas de ovos têm como principal componente o carbonato de cálcio e são resíduos, e assim comparar com o óxido de cálcio obtido a partir do carbonato de cálcio PA.
- Usar hidróxido de sódio como catalisador *ex-situ* no processo de micropirólise, visto que ele também é extremamente alcalino e é mais barato do que o hidróxido de potássio. Poderia também comparar o hidróxido de sódio PA com o hidróxido de sódio comercial encontrado em supermercados e mercearias.
- Usar catálise *in-situ* no processo de micropirólise.

3) Outras sugestões:

- Avaliar se seria possível fazer esse processo sem a utilização do gás inerte.
- Tentar encontrar uma forma de capturar e armazenar o gás de pirólise.
- Avaliar as propriedades reológicas do bio-óleo, como viscosidade e densidade e avaliá-las como elas mudam com a temperatura.
- Métodos de melhorar a qualidade do bio-óleo, após sua produção.
- Estudar a capacidade de adsorção do carvão produzido, assim como sua ativação.

7. REFERÊNCIAS

- ABU BAKAR, Muhammad S.; TITILOYE, James O. Catalytic pyrolysis of rice husk for bio-oil production. *In: Elsevier B.V.*, 27 jul. 2012.
- ALIYU, A.; LEE, J. G. M.; HARVEY, A. P. Microalgae for biofuels: A review of thermochemical conversion processes and associated opportunities and challenges. **Bioresource Technology Reports**. Elsevier Ltd, 1 set. 2021.
- ALMEIDA, Marlon Brando Bezerra de. Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gasóleo em craqueamento catalítico. 2008.
- ALVARENGA, Larissa Machado. Pirólise de resíduos de embalagens cartonadas e seus componentes puros: uma avaliação cinética. 2013.
- ANDRADE, Azarias Machado de *et al.* Pirólise de resíduos do coco-da-baía (*Cocos nucifera Linn*) e análise do carvão vegetal. 2004.
- ANTERO, Romario Victor Pacheco *et al.* Obtaining hydrochar via hydrothermal carbonization of magonia pubescens a. St. hil. sapindaceae fruit bark: Characterization and evaluation of its adsorptive properties. **Revista Materia**, v. 24, n. 2, 2019.
- APPL, Max. Ammonia. 2006.
- ASTM. **Standard Test Method for Ash in Wood**. West Conshohocken, 2001.
- ASTM. **Standard Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels**. West Conshohocken, 1998.
- ASTM. **Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuel**. West Conshohocken, 1998.
- BARBOSA, Bianca Moreira *et al.* Qualidade de briquetes produzidos a partir do mix de resíduo agroindustrial com eucalipto. *In: Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal*. Editora Científica Digital, 2021. p. 185–196.
- BASU, Prabir. **Biomass gasification and pyrolysis : practical design and theory**. Academic Press, 2010.

Mudanças climáticas: as provas de que o aquecimento global é causado pelos humanos. BBC, 4 de nov. 2021. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-59148373>>. Acesso em: 16 de dez. de 2025.

BEZERRA, Franciel Aureliano *et al.* Pirólise catalítica do PEBD usando como catalisador a vermiculita modificada. **Polímeros**, v. 26, p. 55–59, 2016.

BOGNER, A. *et al.* A history of scanning electron microscopy developments: Towards “wet-STEM” imaging. **Micron**, v. 38, n. 4, p. 390–401, jun. 2007.

Bosque do Jatobá. Apresentação. Uberlândia. Facebook: Bosque do Jatobá, [s.d]. Disponível em: <https://www.facebook.com/BosqueDoJatoba/directory_basic_info>. Acesso em: 16 de dez. de 2025.

BRANDÃO, Rodrigo F. *et al.* Synthesis, Characterization and use of Nb₂O₅ based Catalysts in Producing Biofuels by Transesterification, Esterification and Pyrolysis J. Braz. Chem. Soc. 2009.

BRIDGWATER, Anthony; GERHAUSER, Heiko; EFFENDI, Astrid. **Biomass pyrolysis**. 2011.

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

BRITO, José Otavio. Estudo tecnológico da madeira de Pinus spp para a produção de carvão vegetal e briquetagem. 1984.

CARDOSO, Carlos Magno Marques. Estudo da remoção de contaminantes emergentes em meio aquoso por carvão ativado alternativo produzido com cascas do fruto de Jatobá (*Hymenaea stigonocarpa* Mart.), utilizando sistema combinado CA-MO. 2020.

CARVALHO, Paulo Ernani Ramalho. Espécies Arbóreas Brasileiras: Vol 1. Brasília: Embrapa, 2003.

CARVALHO, Paulo Ernani Ramalho. Espécies Arbóreas Brasileiras: Vol 2. Brasília: Embrapa, 2006.

CAVALLARO, Reginaldo José. Estudo da pirólise assistida por micro-ondas de biomassas alternativas provenientes do cerrado brasileiro. 2025.

CHANEY, Rufus L. Food safety issues for mineral and organic fertilizers. *In: Advances in Agronomy*. Academic Press Inc., 2012. v. 117 p. 51–116.

CHANNIWALA, S. A.; PARIKH, P. P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. 2002.

CIPRIANO, Josângela *et al.* O gênero *Hymenaea* e suas espécies mais importantes do ponto de vista econômico e medicinal para o Brasil. 2014.

COLLIE, Robert L. Solar heating system. 1976.

COSTA, Walter da Silva; SOUZA, Agostinho Lopes de; SOUZA, Priscila Bezerra de. Jatobá/*Hymenaea courbaril*. 2011.

CZERNIK, Stefan; EVANS, Robert; FRENCH, Richard. Hydrogen from biomass-production by steam reforming of biomass pyrolysis oil. **Catalysis Today**, v. 129, n. 3–4, p. 265–268, 15 dez. 2007.

DANA, James Dwight; HURLBUT, Cornelius S. MANUAL OF MINERALOGY. 1944.

DE HARVEN, E.; LEUNG, R.; CHRISTENSEN, H. A Novel Approach for Scanning Electron Microscopy of Colloidal Gold-labeled Cell Surfaces. 1984.

DOMINGUES, Rimena R. *et al.* Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. PLoS ONE, v. 12, n. 5, 1 maio 2017.

DOSTIE, Lance; RAUSIS, Kwon; POWER, Ian M. Passive direct air capture using calcium oxide powder: The importance of water vapor. **Journal of Cleaner Production**, v. 457, 10 jun. 2024.

Agência Gov. Na Refinaria Riograndense, tecnologia Petrobras transforma massa de eucalipto em combustível. EBC, Brasília 10 de mar. de 2025. Disponível em: <<https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202503/refinaria-riograndense-tecnologia-petrobras-transforma-massa-eucalipto-combustivel>>. Acesso em: 16 de dez. de 2025

EPA. Greenhouse Gas Overview. Disponível em: <https://www-epa.gov.translate.google.com/translate/ghgemissions/overview-greenhouse-gases?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=sge#:~:text=Di%C3%B3xido%20d>

e%20carbono%20(%20CO%E2%82%82%20)%20;,%2C%20na%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20cimento).>. Acesso em 16 de dez. de 2025.

ESCARDINO, A. *et al.* Calcium carbonate thermal decomposition in white-body wall tile during firing. I. Kinetic study. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 30, n. 10, p. 1989–2001, ago. 2010.

EVANS, G.; SMITH, C. 5.11 - Biomass to Liquids Technology. *In: Comprehensive Renewable Energy*. Elsevier, 2012. p. 155–204.

FAN, Liangliang *et al.* *Ex-situ* catalytic upgrading of vapors from microwave-assisted pyrolysis of low-density polyethylene with MgO. **Energy Conversion and Management**, v. 149, p. 432–441, 2017.

FANG, Zhen; SMITH, Richard L.; XU, Lujiang. **Biofuels and Biorefineries 10 Production off Biofuels and Chemicals with Pyrolysis**. 2020. Disponível em: <<http://www.springer.com/series/11687>>.

FERREIRA, Eduardo da Silva Barbosa. **COMPÓSITOS PP/PÓ DE MADEIRA DE JATOBÁ COMPATIBILIZADOS COM EPDM-MA**. 2020.

LOPES, Janaína. Refinaria no RS testa produção de combustíveis a partir de bio-óleo de eucalipto. G1. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2025/03/15/refinaria-no-rs-testa-producao-de-combustiveis-a-partir-de-bio-oleo-de-eucalipto.ghtml>>. Acesso em: 16 de dez. de 2025.

HAMILTON, James *et al.* **A systematic review of solar driven waste to fuel pyrolysis technology for the Australian state of Victoria**. **Energy Reports** Elsevier Ltd, 1 nov. 2020.

HARRIS, Peter J. F. On charcoal. **Interdisciplinary Science Reviews**, v. 24, n. 4, p. 301–306, 1999.

HE, Wenjing *et al.* Catalytic pyrolysis and *in-situ* carbonization of walnut shells: poly-generation and enhanced electrochemical performance of carbons. **RSC Advances**, v. 14, n. 17, p. 12255–12264, 16 abr. 2024.

HORNUNG, Andreas; APFELBACHER, Andreas. Staged biomass pyrolysis process and apparatus. 18 nov. 2010.

HOU, Liyu *et al.* Analysis of micro/nanoplastics on the surface of polystyrene foam lunch boxes by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 190, p. 107161, 1 set. 2025.

HU, Mian *et al.* Towards understanding the chemical reactions between KOH and oxygen-containing groups during KOH-catalyzed pyrolysis of biomass. *Energy*, v. 245, 15 abr. 2022.

Overview of Greenhouse Gases, EPA, 16 de jan de 2025. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>>. Acesso em 16 de dez de 2025.

IISA, Kristiina *et al.* *In-situ* and *Ex-situ* Catalytic Pyrolysis of Pine in a Bench-Scale Fluidized Bed Reactor System. *Energy and Fuels*, v. 30, n. 3, p. 2144–2157, 17 mar. 2016.

IRFAN, Muhammad *et al.* Production of combustible fuels and carbon nanotubes from plastic wastes using an *in-situ* catalytic microwave pyrolysis process. *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, 1 dez. 2023.

JOARDDER, M. U. H. *et al.* Solar pyrolysis: Converting waste into asset using solar energy. *In: Clean Energy for Sustainable Development: Comparisons and Contrasts of New Approaches*. Elsevier Inc., 2017. p. 213–235.

KANTAKANIT, P. *et al.* Hydrochar Generation from Hydrothermal Carbonization of Organic Wastes. *In: Institute of Physics Publishing*, 14 jun. 2018.

KARELLAS, Sotirios; ROUMPEDAKIS, Tryfon C. Solar thermal power plants. *In: Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies*. Elsevier, 2019. p. 179–235.

KHEDULKAR, Akhil Pradiprao *et al.* Sustainable high-energy supercapacitors: Metal oxide-agricultural waste biochar composites paving the way for a greener future. *Journal of Energy Storage*. Elsevier Ltd, 30 jan. 2024.

KHEYRIYEH, Amir Hossein *et al.* The feasibility study of transfer arc plasma pyrolysis system for petrochemical wastes: Hydrogen production from Antar, OTD, and Tar. *Heliyon*, v. 11, n. 1, p. e41451, jan. 2025.

KUMAR, Adarsh *et al.* Utilization of lignin: A sustainable and eco-friendly approach. *Journal of the Energy Institute*. Elsevier B.V. 1 fev. 2020.

KUMAR, Kavan; PANWAR, N. L. Pyrolysis technologies for biochar production in waste management: a review. *Clean Energy*, v. 8, n. 4, p. 61–78, 1 ago. 2024.

LAM, Su Shiung *et al.* Microwave-assisted pyrolysis with chemical activation, an innovative method to convert orange peel into activated carbon with improved properties as dye adsorbent. *Journal of Cleaner Production*, v. 162, p. 1376–1387, 20 set. 2017.

LEAL-QUIRÓS, Edbertho. Plasma Processing of Municipal Solid Waste. *Brazilian Journal of Physics*. 2004.

LEON, Adriana Estrada *et al.* Micro-pyrolysis of various lignocellulosic biomasses in molten chloride salts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 168, 1 nov. 2022.

LI, Ting Yan *et al.* Prediction of char production from slow pyrolysis of lignocellulosic biomass using multiple nonlinear regression and artificial neural network. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 159, 1 out. 2021.

LIESKOVSKÝ, Martin *et al.* Ash Content vs. the Economics of Using Wood Chips for Energy: Model Based on Data from Central Europe. 2017.

MANSOR, Adila Maisyarah *et al.* Potential commercialisation of biocoke production in Malaysia—A best evidence review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 1 jul. 2018.

MARAFON, Anderson Carlos *et al.* Poder Calorífico do Capim-Elefante para a Geração de Energia Térmica Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Tabuleiros Costeiros Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2016.

MASOUMI, Shima *et al.* Hydrochar: A review on its production technologies and applications. *Catalysts* MDPI, 1 ago. 2021.

MAYER, Zsuzsa A.; APFELBACHER, Andreas; HORNUNG, Andreas. A comparative study on the pyrolysis of metal- and ash-enriched wood and the combustion properties of the gained char. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 96, p. 196–202, 2012.

MIRANDA, Mara Rúbia da Silva. INVESTIGAÇÃO DA PIRÓLISE DE BIOMASSAS DO CERRADO PARA APLICAÇÃO À SISTEMAS DE GASEIFICAÇÃO ESTAGIADA. 2017.

Why can't we put metal objects in a microwave? MIT SCHOOL OF ENGINEERING. 11 de jan de 2010. Disponível em: <<https://engineering.mit.edu/ask-an-engineer/why-cant-we-put-metal-objects-in-a-microwave>>. Acesso em 23 de dez. de 2025.

MIURA, Masakatsu *et al.* Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 71, n. 1, p. 187–199, 2004.

MUNIR, Dureem; USMAN, Muhammad Rashid. Catalytic hydropyrolysis of a model municipal waste plastic mixture over composite USY/SBA-16 catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 135, p. 44–53, 1 out. 2018.

MUSHTAQ, Faisal; MAT, Ramli; ANI, Farid Nasir. A review on microwave assisted pyrolysis of coal and biomass for fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 2014.

NDOUNG, Ornelle Christiane Ngo; FIGUEIREDO, Cícero Célio de; RAMOS, Maria Lucrécia Gerosa. *Hardcore twenty-four: a Stephanie Plum novel*. Random House Audio, 2021.

NEMA, S. K. *et al.* Sanjeev Soni Central Scientific Instruments Organisation Plasma Pyrolysis Technology and its Evolution at FCIPT, Institute for Plasma Research, India. 2016.

NHUCHHEN, Daya Ram. Prediction of carbon, hydrogen, and oxygen compositions of raw and torrefied biomass using proximate analysis. *Fuel*, v. 180, p. 348–356, 15 set. 2016.

OLIVEIRA, Tiago José Pires De. *Pirólise rápida de casca de soja: desenvolvimento do reator de leito fluidizado, análise do bio-óleo produzido e do vapor obtido na pirólise analítica*. 2015.

OSTWALD, Wilhelm Friedrich. *Process of manufacturing nitric acid*. 1902.

PAHNILA, Mika *et al.* A Review of Pyrolysis Technologies and the Effect of Process Parameters on Biocarbon Properties. *Energies Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 1 out. 2023.

PARIKH, Jigisha; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, v. 84, n. 5, p. 487–494, mar. 2005.

PARIKH, Jigisha; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. *Fuel*, v. 86, n. 12–13, p. 1710–1719, ago. 2007.

PECHA, Brennan; GARCIA-PEREZ, Manuel. Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass. *In: Bioenergy*. Elsevier, 2015. p. 413–442.

PEREIRA, Luís Gabriel Gomes. Valorização do bio-óleo residual de sisal. 2023.

Com tecnologia Petrobras, Refinaria Riograndense é a primeira a produzir combustíveis com conteúdo celulósico no Brasil. Petrobrás. Rio de Janeiro, 10 de mar. de 2025. Disponível em: <<https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/com-tecnologia-petrobras-refinaria-riograndense-e-a-primeira-a-produzir-combustiveis-com-conteudo-celulosico-no-brasil>>. Acesso em 22 de jan. de 2026.

Petrobras testa bio-óleo para produção de combustíveis sustentáveis. Petrobrás. Rio de Janeiro, 01 de jul. de 2022. Disponível em: <<https://agencia.petrobras.com.br/w/petrobras-testa-bio-oleo-para-producao-de-combustiveis-sustentaveis>>. Acesso em 22 de jan. de 2026.

PICÓ, Yolanda; BARCELÓ, Damià. Pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry in environmental analysis: Focus on organic matter and microplastics. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*. Elsevier B.V. 1 set. 2020.

PIGHINELLI, Anna Leticia Montenegro Turtelli et al. Processos termoquímicos aplicados à biomassa florestal. dez. 2018.

Peneira Granulométrica Inox ASTM 3-4- Tyler Grande. Prolab. São Paulo. 10 de dez. de 2024. Disponível em: <<https://www.lojaprolab.com.br/peneira-granulometrica-inox-astm-3-4-tyler-grande-95612>>. Acesso em 22 de jan. de 2026.

PUJADÓ, P. R. et al. Industrial catalytic applications of molecular sieves *Catalysis Today*. 1992.

PUNČOCHÁŘ, M.; RUJ, B.; CHATTERJEE, P. K. Development of process for disposal of plastic waste using plasma pyrolysis technology and option for energy recovery. *In: Elsevier Ltd*, 2012.

RAHIMPOUR, M. R.; NATEGH, M. Hydrogen production from pyrolysis-derived bio-oil using membrane reactors. *In: Membrane Technologies for Biorefining*. Elsevier Inc., 2016. p. 411–434.

- RAJMOHAN, K. S. et al. Perspectives on bio-oil recovery from plastic waste. In: Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Resource Recovery from Wastes. Elsevier, 2020. p. 459–480.
- RAY, G. E. Energy economics-a random walk in history. 1979.
- RENZ, Michael. Ketonization of carboxylic acids by decarboxylation: Mechanism and scope. European Journal of Organic Chemistry, 11 mar. 2005.
- RESENDE, K. A.; NORONHA, F. B.; HORI, C. E. Hydrodeoxygenation of phenol over metal supported niobia catalysts. Renewable Energy, v. 149, p. 198–207, 1 abr. 2020.
- REZA, Md Sumon et al. Influence of Catalyst on the Yield and Quality of Bio-Oil for the Catalytic Pyrolysis of Biomass: A Comprehensive Review. Energies Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 1 jul. 2023.
- RIES, Lúcia Allebrandt da Silva et al. CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA RESIDUAL DA COLHEITA DE EUCALYPTUS SALIGNA PARA PROCESSOS DE CONVERSÃO TÉRMICA. In: Recursos Naturais: energia de biomassa florestal - Volume 2. Editora Científica Digital, 2021. p. 12–31.
- Rima. Ligas para Siderurgia. Disponível em: <<https://www.rima.com.br/services/ligas-para-siderurgia/>>. Acesso em 06 de novembro de 2025.
- Rima. Silício metálico. Disponível em: <<https://www.rima.com.br/services/silicio/>>. Acesso em 06 de novembro de 2025.
- SANO, Sueli Matiko; AGOSTINI-COSTA, Tânia da Silveira; FARIA, Juliana Pereira. *Hymenaea stigonocarpa* Jatobá-do-cerrado. 2016.
- SANTANA, Thiago Coelho de. Uso do extrato de folhas do jatobá (*Hymenaea martiana* Hayne) na redução das contagens de *Salmonella spp.*, *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* em leite cru. 2015.
- SANTOS, Grazielle Emanuella de Souza dos et al. From brewers' waste to fuel precursors: Catalytic pyrolysis of BSG using CaO and Nb₂O₅-based catalysts for enhanced hydrocarbon production. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 185, 1 jan. 2025.

SANTOS, Grazielle. Estudo da pirólise catalítica do bagaço de malte via micropirólise e leito de jorro: caracterização dos produtos e otimização do rendimento e da qualidade do bio-óleo. 15 fev. 2023.

SANTOS, Sueli de Fátima de Oliveira Miranda; HATAKEYAMA, Kazuo. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. *Producao*, v. 22, n. 2, p. 309–321, 2013.

SCHULTZ, Emerson Léo; SOARES, Itânia Pinheiro. Reforma do biogás – revisão. 2014.

SEMIL-SP - Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística de SP. Jatobá patrimônio brasileiro. 22 de fev de 2016. Disponível em: < <https://semil.sp.gov.br/2016/02/jatoba-patrimonio-brasileiro/>>. Acesso em 26 de jan. de 2026.

SHARMA, Amit Kumar et al. A critical review on biochar production from pine wastes, upgradation techniques, environmental sustainability, and challenges. *Bioresource Technology* Elsevier Ltd, 1 nov. 2023.

SHEN, Jianfeng et al. The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. *Energy Conversion and Management*, v. 51, n. 5, p. 983–987, maio de 2010.

SHIRAZI, Yaser; VIAMAJALA, Sridhar; VARANASI, Sasidhar. *In-situ* and *Ex-situ* Catalytic Pyrolysis of Microalgae and Integration With Pyrolytic Fractionation. *Frontiers in Chemistry*, v. 8, 10 set. 2020.

SILVA, Amanda Carla Ribeiro. Pirólise rápida catalítica de sabugo de milho: seletividade dos catalisadores HZSM-5 e H β para a produção de hidrocarbonetos aromáticos. 27 mar. 2020.

SILVA, Conceição de Maria Sales da. Carbonização Hidrotérmica dos caroços de Açaí (*Euterpe oleracea*, mart) com H₂O Quente Comprimida. 2021.

SOUZA, Marcio R. O. de et al. Estudo do Óxido de Nióbio como Catalisador na Degradação do Polímero de Alta Densidade (PEAD). 2025.

SOUZA, Isis P. A. F. et al. Preparation of biosorbents from the Jatoba (*Hymenaea courbaril*) fruit shell for removal of Pb(II) and Cd(II) from aqueous solution. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 189, n. 12, 1 dez. 2017.

STEFANIDIS, S. D. et al. *In-situ* upgrading of biomass pyrolysis vapors: Catalyst screening on a fixed bed reactor. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 17, p. 8261–8267, set. 2011.

SUZUKI, E. High-resolution scanning electron microscopy of immunogold-labelled cells by the use of thin plasma coating of osmium *Journal of Microscopy*. 2002.

TAN, H. et al. A Review On The Comparison Between Slow Pyrolysis And Fast Pyrolysis On The Quality Of Lignocellulosic And Lignin-Based Biochar. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 1051, n. 1, p. 012075, 1 fev. 2021.

TETRA PAK. Materiais da embalagem cartonada. Disponível em: <<https://www.tetrapak.com/pt-br/solutions/packaging/packaging-material>>. Acesso em 26 de jan. de 2026.

THE ARIZONA UNIVERSITY. Before global warming, was Earth cooling down or heating up?. 20 de fev. de 2025. Disponível em: <<https://news.arizona.edu/news/global-warming-was-earth-cooling-down-or-heating>>. Acesso em 26 de jan. de 2026.

UFSM. Projeto da UFSM auxilia na produção sustentável de carvão vegetal. 25 de abr. de 2025. Disponível em: <<https://www.ufsm.br/2024/04/25/projeto-da-ufsm-auxilia-na-producao-sustentavel-de-carvao-vegetal#:~:text=Produ%C3%A7%C3%A3o%20do%20carv%C3%A3o%20vegetal,um%20impacto%20m%C3%ADnimo%20%C3%A0%20atmosfera>>. Acesso em 26 de jan. de 2026.

UGA. A new, green fuel. 6 de abr. de 2007. Disponível em: <<https://news.uga.edu/a-new-green-fuel/>>. Acesso em 26 de jan. de 2026.

UNFCCC. The Paris Agreement. Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>>. Acesso em 26 de jan. de 2026.

UNITED NATIONS. United Nations Conference on the Human Environment, Stockholm 1972. Disponível em: <<https://www.un.org/en/conferences/environment/stockholm1972>>. Acesso em 26 de jan. de 2026.

UNITED NATIONS. United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, Brazil, 3-14 June 1992. Disponível em: <<https://www.un.org/en/conferences/environment/rio1992>>. Acesso em 26 de jan. de 2026.

WANG, Qing *et al.* Effect of CaO on Pyrolysis Products and Reaction Mechanisms of a Corn Stover. **ACS Omega**, v. 5, n. 18, p. 10276–10287, 12 maio 2020.

YANG, Y. *et al.* Intermediate pyrolysis of biomass energy pellets for producing sustainable liquid, gaseous and solid fuels. **Bioresource Technology**, v. 169, p. 794–799, 2014.

YOGANANDHAM, Suman Thodhal; SATHYAMOORTHY, Gayathri; RENUKA, Remya Rajan. Emerging extraction techniques: Hydrothermal processing. *In: Sustainable Seaweed Technologies: Cultivation, Biorefinery, and Applications*. Elsevier, 2020. p. 191–205.

YOUNG, Jay A. **Chemical Education Today**. 2007. Disponível em: <www.JCE.DivCHED.org>.

8. APÊNDICE

Composição dos voláteis detectada pelo processo de micropirólise estão representadas nas tabelas 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5 e 8.6.

Tabela 8.1 - Resultado dos testes de micropirólise feitos na ausência de catalisadores

	450 - 1	450 - 2	450 - média	550 - 1	550 - 2	550 - média	650 - 1	650 - 2	650 - média
Hidrocarbonetos	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,5	4,37	2,82	3,6
Nitrogenado	1,1	0,0	0,5	0,2	0,5	0,3	3,40	0,93	2,2
Oxigenados	89,8	74,7	82,2	89,0	81,3	85,1	84,56	91,79	88,2
Outros	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0
Não identificados	9,1	25,3	17,2	10,3	17,8	14,1	7,7	4,5	6,1

Fonte: autoria própria

Tabela 8.2 - Resultados dos experimentos de micropirólise na presença de KOH

	450 - 1	450 - 2	450 - média	550 - 1	550 - 2	550 - média	650 - 1	650 - 2	650 - média
Hidrocarbonetos	10,2	14,1	12,2	13,3	10,7	12,0	17,70	16,52	17,1
Nitrogenado	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,11	0,38	0,7
Oxigenados	56,4	66,2	61,3	76,0	83,9	79,9	58,84	77,77	68,3
Outros	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,23	0,1
Não identificados	33,3	19,7	26,5	10,7	5,5	8,1	22,3	5,1	13,7

Fonte: autoria própria

Tabela 8.3 - Resultados dos experimentos de micropirólise na presença de CaO

	450 - 1	450 - 2	450 - média	550 - 1	550 - 2	550 - média	650 - 1	650 - 2	650 - média
Hidrocarbonetos	12,5	9,9	11,2	12,7	12,7	12,7	14,29	15,62	15,0
Nitrogenado	3,0	0,0	1,5	1,1	25,4	13,2	28,29	26,24	27,3
Oxigenados	70,8	68,1	69,4	60,0	47,2	53,6	44,69	44,44	44,6
Outros	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	1,4	0,0	4,97	2,5
Não identificados	13,7	22,0	17,9	23,4	14,7	19,1	12,7	8,7	10,7

Fonte: autoria própria

Tabela 8.4 - Resultados dos experimentos de micropirólise na presença de zeólita 3A

	450 - 1	450 - 2	450 - média	550 - 1	550 - 2	550 - média	650 - 1	650 - 2	650 - média
Hidrocarbonetos	5,3	5,5	5,4	2,3	3,5	2,9	8,14	14,48	11,3
Nitrogenado	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,4	0,00	0,00	0,0
Oxigenados	90,1	82,3	86,2	61,1	69,7	65,4	89,74	65,17	77,5
Outros	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0
Não identificados	4,7	12,3	8,5	36,5	26,1	31,3	2,1	20,4	11,2

Fonte: autoria própria

Tabela 8.5 - Resultados dos experimentos de micropirólise na presença de resíduo de mineração de fosfato

	450 - 1	450 - 2	450 - média	550 - 1	550 - 2	550 - média	650 - 1	650 - 2	650 - média
Hidrocarbonetos	2,2	1,2	1,7	5,7	3,8	4,7	3,83	2,96	3,4
Nitrogenado	0,0	0,2	0,1	0,0	0,2	0,1	3,44	0,62	2,0
Oxigenados	61,3	71,7	66,5	71,2	84,0	77,6	82,47	88,53	85,5
Outros	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0
Não identificados	36,5	26,9	31,7	23,2	12,0	17,6	10,3	7,9	9,1

Fonte: autoria própria

Tabela 8.6 - Resultados dos experimentos de micropirólise na presença de Nb₂O₅

	450 - 1	450 - 2	450 - média	550 - 1	550 - 2	550 - média	650 - 1	650 - 2	650 - média
Hidrocarbonetos	3,2	3,4	3,3	3,6	2,6	3,1	6,26	6,65	6,5
Nitrogenado	0,1	1,2	0,7	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,0
Oxigenados	90,7	85,0	87,8	89,3	75,8	82,5	62,40	87,93	75,2
Outros	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,3	3,34	0,00	1,7
Não identificados	6,0	10,3	8,2	6,8	21,4	14,1	28,0	5,4	16,7

Fonte: autoria própria