

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

LAURA MARIA SILVA DOS SANTOS MULATINHO

**PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS VIA
PIRÓLISE: AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA POR CROMATOGRAFIA.**

Maceió
2024

LAURA MARIA SIVA DOS SANTOS MULATINHO

**PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS VIA
PIRÓLISE: AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA POR CROMATOGRAFIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Química da
Universidade Federal de Alagoas como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Orientador/a: Prof. Dr. João Inácio Soletti

Coorientador/a: Dr. Mozart Daltro Bispo

Maceió
2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

M954p Mulatinho, Laura Maria Silva dos Santos.

Produção de bio-óleo a partir de resíduos sólidos urbanos via pirólise :
avaliação físico-química por cromatografia / Laura Maria Silva dos Santos
Mulatinho. – 2024.

51 f. : il. color.

Orientador: João Inácio Soletti.

Coorientador: Mozart Daltro Bispo.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química)
– Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 44-51.

1. Resíduos sólidos urbanos – Tratamento. 2. Pirólise. 3. Bio-óleo. 4.
Cromatografia gasosa. I. Título.

CDU: 66.092-977

FOLHA DE APROVAÇÃO

**LAURA MARIA SILVA DOS SANTOS
MULATINHO**

**PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO A PARTIR DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS VIA PIRÓLISE: AVALIAÇÃO FÍSICO-
QUÍMICA PORCROMATOGRÁFIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Química da
Universidade Federal de Alagoas como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química,
apresentado em 26/02/2024.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

JOAO INACIO SOLETTI

Data: 15/03/2024 06:20:18-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Orientador: Prof. Dr. João Inácio Soletti
(Universidade Federal de Alagoas)**



Documento assinado digitalmente

ANTONIO OSIMAR SOUSA DA SILVA

Data: 14/03/2024 13:08:39-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Antônio Osimar Souza da Silva
(Universidade Federal de Alagoas)**



Documento assinado digitalmente

EDUARDO LUCENA CAVALCANTE DE AMORIM

Data: 13/03/2024 18:17:13-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim
(Universidade Federal de Alagoas)**

AGRADECIMENTOS

A Deus;

Ao Philipe, pela paciência e incentivo;

Aos meus amigos, sobretudo os da Engenharia Química (Adryelle, Agda e Bruna, que ajudaram diretamente no trabalho, e Franciele, Samara, Gabriel, Carlos, Clara, Pedro, Larissa e Bianca), por todo apoio e companheirismo nessa árdua jornada;

Ao meu orientador e meu co-orientador, pela orientação e confiança ao longo deste trabalho;

Ao pessoal do Laboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos, pela ajuda em várias etapas do trabalho;

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

O Tratamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é uma das atividades mais importantes executadas pelo poder público, que é responsável pela gestão da forma como o lixo é coletado e transportado, bem como o seu destino e disposição final adequada. Dessa forma, com os questionamentos levantados a respeito dos impactos ambientais que os RSU podem apresentar, pesquisas vêm buscando soluções para seu tratamento por diversas abordagens, sendo uma delas a pirólise, que consiste em um processo tecnológico para o uso eficiente desses resíduos, resultando na redução do volume e remoção de poluentes tóxicos, além de poder recuperar energia e produzir uma variedade de produtos químicos. Com isso, o trabalho teve como objetivos a produção de bio-óleo através desse processo termoquímico para diferentes resíduos sólidos urbanos, avaliando sua composição por meio de análises cromatográficas. Os RSU utilizados (papel, papelão e trapos) foram preparados, caracterizados pelas análises termogravimétrica e elementar, e pelos teores de carbono fixo, cinzas, materiais voláteis e umidade, e foram utilizados para realização das pirólises. Após os bio-óleos de cada material terem sido gerados e passados pela extração líquido-líquido, foram submetidos a análises por cromatografia gasosa utilizando espectro de massas para haver a identificação e avaliação dos principais compostos em cada bio-óleo. Os bio-óleos tiveram rendimentos de 39,5g no de papel, 34,25g no de papelão, 14,15g no de poliéster e 38,7g no de algodão, com composições majoritárias de cetonas, fenóis e ácidos carboxílicos, além de hidrocarbonetos alcenos presentes no de algodão.

Palavras-chave: Resíduos; Processo termoquímico; Bio-óleo; Cromatografia gasosa.

ABSTRACT

The Treatment of Municipal Solid Waste (MSW) is one of the most important activities carried out by public authorities, which is responsible for managing the way waste is collected and transported, as well as its destination and appropriate final disposal. Thus, with the questions raised regarding the environmental impacts that MSW can present, research has been seeking solutions for its treatment through different approaches, one of which is pyrolysis, which consists of a technological process for the efficient use of these wastes, resulting in the volume reduction and removal of toxic pollutants, in addition to being able to recover energy and produce a variety of chemicals. Therefore, the objective of the work was to produce bio-oil through this thermochemical process for different municipal solid waste, evaluating its composition through chromatographic analysis. The MSW used (paper, cardboard and rags) were prepared, characterized by thermogravimetric and elemental analysis, and by the content of fixed carbon, ash, volatile materials and moisture, and were used to carry out pyrolysis. After the bio-oils from each material were generated and passed through liquid-liquid extraction, they were subjected to analysis by gas chromatography using mass spectrum to identify and evaluate the main compounds in each bio-oil. The bio-oils had yields of 39.5g in paper, 34.25g in cardboard, 14.15g in polyester and 38.7g in cotton, with majority compositions of ketones, phenols and carboxylic acids, in addition to alkene hydrocarbons present in cotton.

Keywords: Waste; thermochemical process; Bio-oil; Gas chromatography.

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al₂O₃ – Óxido de Alumínio

CH₄ - Metano

CHN – Carbono, Nitrogênio e Oxigênio

CO₂ - Gás carbônico

DrTGA - Derivative Thermogravimetric Analysis

EDTA - Ethylenediaminetetraacetic Acid

GC – Gas Chromatography

GCxGC - Cromatografia gasosa bidimensional abrangente

H₂ – Gás Hidrogênio

He – Hélio

HPLC – High-Performance Liquid Chromatography

HS - Headspace extraction

IR - índice de retenção;

LASSOP – Laboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos

LLE - Liquid-Liquid extraction

LPQRN – Laboratório de Pesquisa em Recursos Naturais

M_{cad} – Massa do cadinho

M_f - Massa final

M_i - Massa inicial

n – n° de carbonos do hidrocarboneto anterior.

N₂ – Gás Nitrogênio

NIST - National Institute of Standards and Technology

NO₂ - Óxido nitroso

qMS - quadrupole Mass Spectrometry

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SPE - Solid Phase Extraction

t_c - tempo de retenção do composto de interesse;

T_c - Teor de cinzas

Tcf – Teor de carbono fixo

TGA - Thermogravimetric Analysis

Tmv - Teor de materiais voláteis

t_n - tempo de retenção do hidrocarboneto anterior;

t_{n+1} - tempo de retenção do hidrocarboneto posterior;

Tu - Teor de umidade

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre os processos termoquímicos.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia do trabalho.

Figura 3 – Desenho esquemático da unidade de pirólise constituído por (A) Controlador de temperatura e taxa de aquecimento; (B) Reator de pirólise (C) Manta de aquecimento (D) Sistema de condensação em série; (E) Coletor do produto líquido da pirólise; (F) Bomba de vácuo.

Figura 4 – Curvas TGA/DrTGA do Papelão.

Figura 5 – Curvas TGA/DrTGA do Papel.

Figura 6 – Curvas TGA/DrTGA do Trapos.

Figura 7 – Curvas TGA/DrTGA dos trapos de algodão.

Figura 8 – Cromatograma comparativo obtido por GC/MS das amostras de bio-óleo de papel.

Figura 9 – Cromatograma comparativo obtido por GC/MS das amostras de bio-óleo de papelão.

Figura 10 – Cromatograma comparativo obtido por GC/MS das amostras de bio-óleo de trapos de poliéster e de algodão

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise elementar e imediata das amostras de RSU.

Tabela 2 - Características da análise termogravimétrica (TGA/DrTGA) dos componentes de RSU.

Tabela 3 - Rendimentos obtidos durante a pirólise dos componentes de RSU.

Tabela 4 - Análise da primeira amostra de bio-óleo proveniente do papel.

Tabela 5 - Análise da segunda amostra de bio-óleo proveniente do papel.

Tabela 6 – Análise da primeira amostra de bio-óleo proveniente do papelão.

Tabela 7 – Análise da segunda amostra de bio-óleo proveniente do papelão.

Tabela 8 – Análise da amostra de bio-óleo proveniente de trapos de poliéster.

Tabela 9 – Análise da amostra de bio-óleo proveniente de trapos de algodão.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS.....	14
2.1 Gerais	14
2.2 Específicos	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 Biomassa	15
3.1.1 Papel	16
3.1.2 Papelão	16
3.1.3 Trapos	17
3.2 Processos Termoquímicos: Pirólise	17
3.3 Bio-óleo	19
3.4 Cromatografia	20
4. METODOLOGIA	21
4.1 Coleta e preparo das amostras	21
4.2 Análise Termogravimétrica (TGA) e Termogravimetria Derivada (DTrGA)	21
4.3 Análise elementar	21
4.4 Análise Imediata	22
4.4.1 Teor de Cinzas	22
4.4.2 Teor de voláteis	22
4.4.3 Teor de Carbono fixo	23
4.4.4 Teor de Umidade	23
4.5 Pirólise	23
4.6 Caracterização por GC/QMS	25
4.6.1 Preparo da amostra.....	25
4.6.1 Análise cromatográfica.....	25
5. RESULTADOS.....	26
5.1 Propriedades físico-químicas	26
5.1.1 Análise elementar (CHN) e imediata	26
5.1.2 Análise termogravimétrica (TGA/DrTGA)	27

5.2 Pirólise: Produção do bio-óleo e biochar	31
5.3 Caracterização por GC/qMS	32
5.3.1 <i>Bio-óleo de papel</i>	32
5.3.2 <i>Bio-óleo de Papelão</i>	35
5.3.3 <i>Bio-óleo de Trapos</i>	38
5.3.4 <i>Uso como biocombustível</i>	41
6. CONCLUSÕES	43
7. REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

A geração e o acúmulo de resíduos sólidos urbanos (RSU) pelo Brasil têm se mostrado maiores com o passar do tempo, com uma taxa de crescimento estimada em 7% por ano, tendo em média uma produção de 1kg/dia por pessoa, e resultando em coletas de aproximadamente 200 mil toneladas. Em Maceió, tem-se uma composição gravimétrica média de 4,69% de papel, 5,69% de papelão e 5,03% de trapos, o que mostra uma parcela significativa do lixo gerado (SILVA *et al.*, 2020).

Como não existem destinações apropriadas para este todo, sendo 60% para aterros sanitários, onde o lixo é tratado de forma menos agressiva ao meio ambiente, e 40% para lixões a céu aberto, esses resíduos se tornam problemáticos em relação aos impactos ambiental e sanitários, por serem responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa e contaminarem o solo com o líquido originário da sua decomposição (chorume), afetando também os lençóis freáticos, além de serem focos de doenças e seus hospedeiros intermediários (GOUVEIA, 2012).

Com isso, algumas alternativas foram consideradas como disposições finais para esses resíduos, como a compostagem e a reciclagem, mas que não têm o devido espaço no cenário atual, sendo práticas aplicadas a uma pequena parcela desse lixo. Uma outra alternativa bastante discutida é a sua incineração que, apesar de suas vantagens, produz muitos gases poluentes e, dessa forma, causa um enorme impacto ambiental, além de que não há um aproveitamento do produto gerado por essa prática. Dessa forma, a pirólise desses resíduos foi colocada em pauta, por ser mais sustentável e apresentar um maior aproveitamento energético (GONÇALVES, 2021).

A pirólise possui uma metodologia de funcionamento mais sustentável e menos poluente quando comparada à outras alternativas, além de apresentar a obtenção de um bio-óleo com alto potencial energético, ou seja, pelo seu poder calorífico, tem a possibilidade de ser utilizado como um combustível, de modo a ampliar o cenário energético brasileiro (PEDROZA *et al.*, 2017).

O procedimento da pirólise consiste numa reação de decomposição que utiliza o calor em pouca ou nenhuma presença de gás oxigênio para degradação da matéria prima e, dessa forma, como não há queima, os gases oriundos dela não são poluentes, se assemelhando ao gás natural e podendo, também, servirem de combustíveis. Assim, para a realização desse processo, é necessária a seleção e trituração da matéria prima, assim como sua secagem, para evitar que

a umidade afete o resultado final e, após isso, ela é colocada em um reator pirolítico, onde as reações endotérmicas de volatilização, oxidação e fusão acontecem, variando entre 300 e 1600°C (DE MORAES *et al.*, 2015).

Contudo, a pirólise desse tipo de matéria-prima ainda vem sendo estudada e analisada, como os estudos feitos por M. S. ISLAM *et al.* (2010) e Y. QIAO *et al.* (2018), juntamente com a caracterização e o tipo de aplicabilidade para o óleo e o *biochar* resultante, que pode ser utilizado na remoção de metais pesados e outras substâncias presentes em efluentes, além da alimentação de caldeiras em diversos setores (DE MORAES *et al.*, 2015).

Para a avaliação e aproveitamento de cada bio-óleo produzido, é necessária a identificação dos compostos presentes com o auxílio da cromatografia gasosa, visto que esse método é muito utilizado em análises de misturas complexas e possui um custo mais baixo quando comparado com outros métodos de caracterização. Porém, existem poucos estudos que utilizam os resíduos de papel, papelão e trapos de forma isolada para análise cromatográfica do seu bio-óleo (BISPO, 2018).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é produzir bio-óleo proveniente de resíduos sólidos urbanos e realizar análises que avaliem a sua possível aplicabilidade na indústria, além da possibilidade de conversão em outros produtos.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Produção de bio-óleo através do processo termoquímico de pirólise para fontes de diferentes resíduos sólidos urbanos (papel, papelão e trapos), assim como a análise do potencial do bio-óleo gerado e possíveis aplicações.

2.2 Específicos

- Caracterizar os RSU;
- Produzir o bio-óleo a partir dos RSU;
- Caracterizar e avaliar por cromatografia o bio-óleo gerado.
- Comparar os resultados obtidos com a literatura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Biomassa

A queima de combustíveis fósseis está diretamente ligada ao aumento da poluição da atmosfera por meio da emissão de gás carbônico (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (NO_2), o que se tornou motivo de preocupação ambiental, por também serem gases do efeito estufa. Somado a isso, também há a preocupação do esgotamento das reservas de petróleo, tendo em vista que são fontes de energia não renováveis. Dessa forma, houve o investimento na utilização de diversas fontes de energia renováveis, como a utilização de diversos tipos de biomassas (NASCIMENTO, 2016).

Biomassa é todo material orgânico de origem vegetal, que deriva da reação entre gás carbônico, água e luz solar, ou seja, pelo processo de fotossíntese, de modo a armazenar fração de energia solar nas ligações químicas de seus componentes. A sua utilização como matéria prima de conversão depende das propriedades químicas e físicas de suas moléculas, sendo necessária a caracterização das biomassas para avaliar que processo de conversão utilizar, além de estudos como a estrutura e densidade da biomassa, teores de umidade, cinzas, carbono fixo e materiais voláteis, poder calorífico, dentre outros (VIEIRA, 2012).

A biomassa é uma importante fonte de energia renovável proveniente de matéria orgânica gerada por organismos autótrofos do reino vegetal, chamada de fitomassa, ou acumulada nos seres heterótrofos do reino animal, conhecida como zoomassa, que pode ser utilizada para produção de calor, eletricidade e biocombustíveis. Diversos recursos podem ser considerados biomassa, tais como madeira, carvão vegetal, resíduos agrícolas, resíduos industriais e lodo de esgoto. Essa fonte de energia é considerada sustentável, uma vez que a quantidade de CO_2 liberada durante sua queima é equivalente à quantidade absorvida pelas plantas durante o crescimento, reduzindo a emissão líquida de gases de efeito estufa. (SOARES *et al.*, 2006).

A biomassa residual, por sua vez, consiste na parte remanescente da biomassa após a utilização de seus produtos primários, como alimentos ou materiais, e acaba sendo considerada como um desperdício. Esses resíduos podem ter origem tanto em atividades agrícolas quanto industriais, e são uma alternativa valiosa para a produção de energia como fonte limpa de combustível, evitando a competição direta com a produção de alimentos, contribuindo para a redução do descarte inadequado de resíduos (NONES *et al.*, 2017)

Um dos resíduos considerados biomassa são os resíduos sólidos urbanos, que compõem a fração de lixo gerada nas áreas urbanas, estando inclusos resíduos domésticos, comerciais e industriais leves, sendo esses majoritariamente papel, papelão, vidros, plásticos, materiais têxteis, restos de comidas e metais. Eles representam uma forma comum de biomassa residual e, portanto, uma oportunidade significativa para a produção de energia limpa e sustentável, levando em consideração que a disposição inadequada dos RSUs é um fator negativo no ponto de vista ambiental e econômico, além do seu grande volume. Em Alagoas, são produzidos mensalmente, em média, 30 mil toneladas de lixo, que são encaminhados para aterros, de acordo com J. Bezerra em Gazeta de Alagoas (2022), e 1700 toneladas de lixo por dia em Maceió, segundo Filho *et al.* (2017).

Através de tecnologias avançadas de conversão, como a pirólise, gaseificação e digestão anaeróbica, é possível transformar os RSUs em biocombustíveis, biogás ou até mesmo em eletricidade, reduzindo a quantidade de resíduos destinados aos aterros sanitários e sua consequente poluição ambiental, além da implementação de políticas adequadas para incentivar o uso responsável e sustentável da biomassa como fonte de energia. (PEDROZA *et al.*, 2017).

3.1.1 Papel

O papel é um material composto majoritariamente por celulose, e um dos que mais são descartados inadequadamente e frequentemente. Ele possui um tempo de decomposição de quatro a seis meses, por conta das substâncias utilizadas em seu processamento e branqueamento, o que contribui para o acúmulo de lixo, de acordo com Pensamento Verde (2018). Dessa forma, mesmo possuindo uma boa porcentagem de material reciclado, sendo 68% no Brasil, ainda há um grande volume de papel sem um destino adequado.

Em Maceió, tendo em vista a sua composição gravimétrica, que é de 4,69% (SILVA *et al.*, 2020), há uma produção diária de aproximadamente 80 toneladas de resíduos de papel.

3.1.2 Papelão

O papelão possui uma produção anual de 3 milhões de toneladas no Brasil, pela grande demanda do seu uso em caixas em geral, especialmente para transporte de

produtos e embalagens, e é um dos resíduos mais reciclados do mundo. Contudo, a depender da aplicação, nem sempre o papelão pode ser reciclado, o que faz com que ele seja destinado a lixões e aterros sanitários (Trashin, 2023).

Diariamente, em Maceió, são produzidas cerca de 97 toneladas de resíduos de papelão, tendo em vista sua composição gravimétrica de 5,69% dos resíduos gerados por mês (SILVA, *et al.*, 2020).

3.1.3 Trapos

No Brasil, 170 mil toneladas de resíduos têxteis são produzidas por ano, sendo apenas 20% reciclados. O grande volume produzido está ligado à cultura fast fashion, em que as roupas são consumidas e descartadas com rapidez. A decomposição dos trapos sintéticos se dá de 100 a 300 anos, e 400 anos para o poliéster, enquanto os de algodão demoram entre 10 a 20 anos (CicloVivo, 2023).

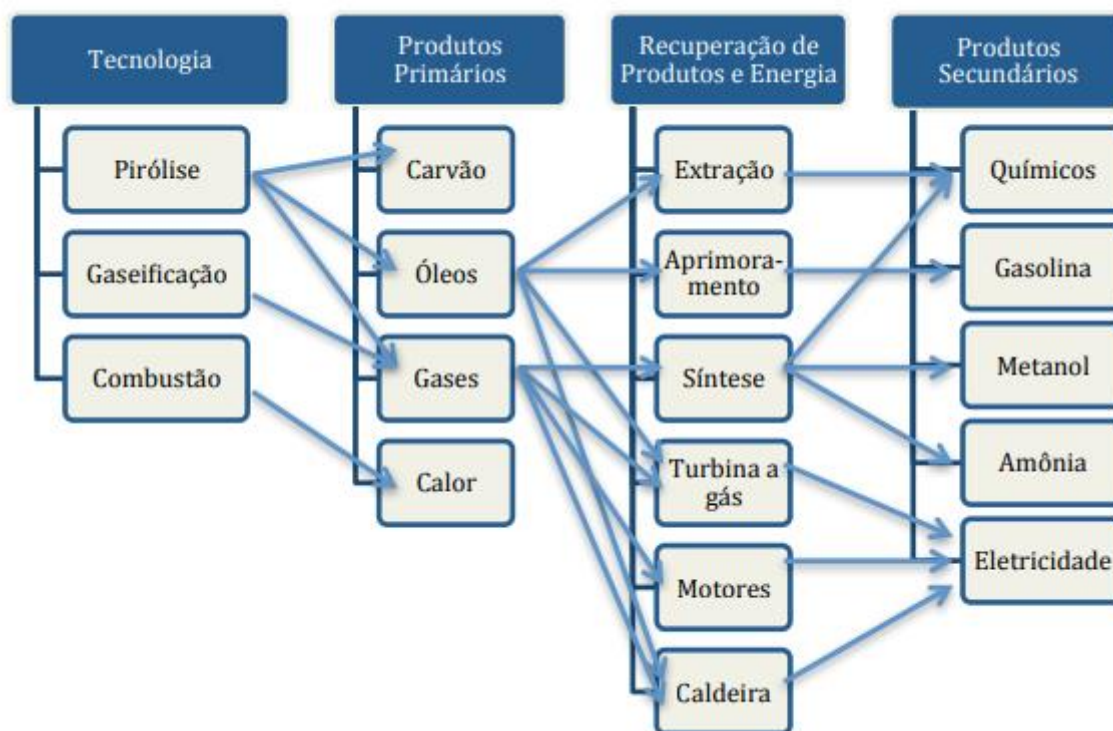
Tendo uma gravimetria de 5,03% no total de resíduos produzidos em Alagoas, de acordo com Silva e *et al* (2020), tem-se um acúmulo de aproximadamente 86 toneladas de trapos por mês.

3.2 Processos Termoquímicos: Pirólise

Existem processos termoquímicos que são bastante utilizados na conversão de biomassa em diversos produtos químicos, geralmente havendo as partes líquida, sólida e gasosa. Dentre eles, se destacam a pirólise, a gaseificação e a combustão, que operam de formas diferentes, com temperaturas e rendimentos diferentes. Com relação aos resíduos sólidos urbanos, a combustão é o processo mais utilizado em seu tratamento, ocorrendo em altas temperaturas que variam de 700 a 1400°C, utilizando o oxigênio em excesso e obtendo dióxido de carbono e vapor de água como produtos, de modo a serem aproveitados para sistemas de aquecimento e geração de energia elétrica. A gaseificação consiste na degradação térmica da biomassa na presença de oxigênio sub-estequiométrico, o ar ou o vapor de água, operando na temperatura de 500 a 1300°C, e gerando o gás de síntese, composto por monóxido de carbono e hidrogênio, podendo se converter em combustíveis renováveis e produtos químicos (SILVEIRA, 2015).

Na **figura 1**, é possível ver a diferença na geração de produtos primários e secundários dos processos termoquímicos supracitados, além da sua versatilidade quanto ao seu uso, a qual destaca-se a pirólise.

Figura 1 - Comparação entre os processos termoquímicos.



Fonte: Adaptado de Bridgwater, (1994) e apud BELGIORNO *et al.*, (2003).

Levando em consideração o elevado rendimento médio de líquidos, a pirólise é um processo que tem bastante espaço no cenário industrial. A pirólise consiste na degradação térmica de uma determinada biomassa à médias e altas temperaturas, variando de 450°C à 700°C, em média, com pouca ou nenhuma presença de oxigênio, de modo a haver diversas reações químicas de transferência de massa e de calor, e uma baixa geração de gases poluentes, se mostrando a opção mais sustentável. Além disso, também se mostra uma opção mais vantajosa em relação aos demais processos, haja vista a geração de um maior número de produtos primários, sendo o bio-óleo, carvão e biogás, que contém vapores orgânicos e gases não condensáveis utilizados para os mais diversos fins industriais, destacando-se o bio-óleo, que apresenta a maior versatilidade em relação às possíveis aplicações, dependendo da qualidade, umidade e granulometria da matéria prima, e da tecnologia de pirólise utilizadas no processo (BISPO, 2018).

A pirólise pode ser lenta, que utiliza baixas taxas de aquecimento, entre 5 e 30 °C min⁻¹, além de um maior tempo de residência no reator, o que favorece a formação dos sólidos, ou também pode ser rápida, que utiliza elevadas taxas de aquecimento, sendo maiores que 100 °C min⁻¹, e baixos tempos de residência, o que contribui para maiores rendimentos de bio-óleo. Essas diferentes vias de processo podem apresentar diferenças dos compostos presentes nos produtos gerados, não só afetando o rendimento, como também sua qualidade (VALADÃO *et al.*, 2021). Dessa forma, a pirólise rápida possui grande atrativo industrial por conta das oportunidades imediatas de aplicação dos bio-óleos gerados, que podem se mostrar ricos em compostos fenólicos, por exemplo, despertando interesse das indústrias de resinas e de pesquisas (FACCINI, 2012).

3.3 Bio-óleo

O bio-óleo é o produto orgânico líquido oriundo do processo de pirólise, geralmente possuindo uma coloração marrom escura e uma composição elementar semelhante à biomassa utilizada, e tem como fator comum um alto teor de oxigênio, densidade e acidez elevadas e menor poder calorífico superior. Por conta disso, esse produto apresenta instabilidade mediante alguns fatores como o tempo, temperatura e exposição ao ar e à luz, podendo sofrer polimerização, o que resulta no aumento da sua viscosidade (BISPO, 2018).

As biomassas são compostas principalmente de hemicelulose, celulose e lignina, que são fragmentadas termicamente e dão origem às possíveis rotas de reação que ocorrem durante a pirólise, incluindo uma produção considerável de ácido acético, de água por desidratação, furfural, ácido fórmico, metanol, dentre outros compostos, o que categoriza o bio-óleo como um combustível líquido renovável, sendo vantajoso em relação aos derivados do petróleo. Contudo, a sua utilização como biocombustível ainda vem sendo estudada, haja vista a necessidade de pesquisas a respeito do tratamento e refino desse óleo, levando em consideração as reações e produtos da pirólise, estabilidade e estocagem (GUEDES *et al.*, 2010).

Para analisar a composição do bio-óleo, é necessária a remoção da fase aquosa presente advinda da água e outros líquidos gerados pelo processo, composta por componentes de maior polaridade, como ácidos orgânicos, levoglucosano, furfural e fenóis. A remoção pode ser realizada decantação com adição de compostos orgânicos ou até água, além de também ser feita comumente pela extração com solventes como o diclorometano ou uma solução de bicarbonato de sódio, porém essa etapa pode afetar a qualidade do bio-óleo, alterando a composição

qualitativa e quantitativa da amostra. As técnicas que podem ser realizadas são a Extração Líquido-Líquido (LLE), Extração por *Headspace* (HS), Extração em Fase Sólida (SPE), dentre outras, sendo aplicadas para preparar a amostra de bio-óleo a ser caracterizada e analisada (BISPO, 2018).

3.4 Cromatografia

A cromatografia é uma técnica de separação de substâncias amplamente utilizada no cenário científico atual, e pode ser realizada por diferentes métodos, como a cromatografia gasosa (GC), que utiliza um material adsorvente revestido na parte interna da coluna capilar como fase estacionária e um gás inerte como gás de arraste, a cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), sendo a mais utilizada para análise de compostos com maior peso molecular ou menor volatilidade, a cromatografia gasosa bidimensional abrangente (GCxGC), que utiliza duas colunas cromatográficas em série, o que fornece uma grande capacidade de separação, dentre outros métodos (BISPO, 2018).

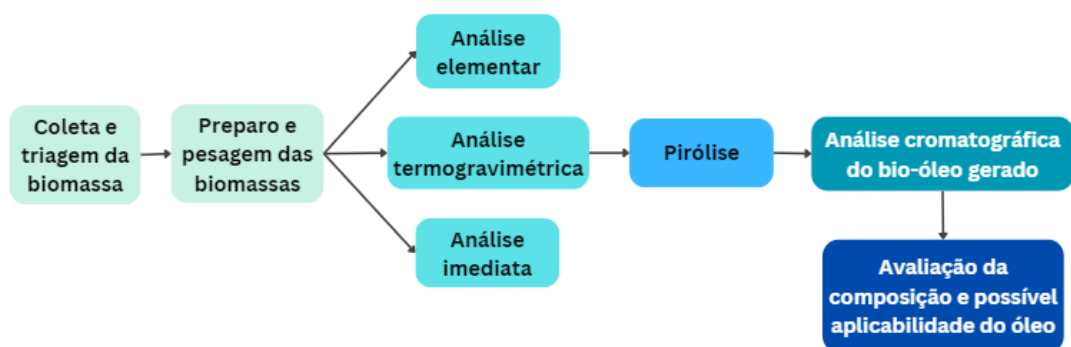
Para haver a identificação da composição química do bio-óleo gerado, a cromatografia gasosa é uma ferramenta importante para análise dos compostos dessa substância complexa, os separando pela sua interação entre a fase estacionária e a fase móvel, para que haja a identificação de cada composto separadamente. Eles percorrem uma coluna no equipamento com auxílio de um gás de arraste, geralmente sendo H₂, N₂ ou He, e são separados no decorrer da corrida, por adsorção, partição ou ponto de ebulição, a depender do cromatógrafo.

Em relação à quantificação dos compostos, é necessária a utilização de um detector, destacando-se o detector quadrupolar de espectrometria de massas (qMS) na análise de bio-óleos, já que fornece, também, a identidade dos compostos presentes. Esse detector funciona com a ionização dos compostos de interesse por meio do aquecimento de um filamento, que produz elétrons com energia suficiente para impactar a amostra, sendo os íons formados direcionados ao detector, que os separa de acordo com a relação massa/carga, sendo possível quantificar cada um. Por fim, para a identificação, é realizada a comparação do espectro de massas com a biblioteca existente no equipamento, utilizando algum software apropriado ou padrões (FACCINI, 2012).

4. METODOLOGIA

A metodologia de execução do trabalho foi dividida em etapas que compõem o fluxograma mostrado na Figura 2:

Figura 2 - Fluxograma da metodologia do trabalho.



Fonte: AUTORA, 2024.

4.1 Coleta e Preparo das Amostras

Os resíduos selecionados como matéria-prima foram o papel, papelão e trapos. Eles foram coletados em residências da cidade de Maceió e no próprio Laboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos (LASSOP). Após esse processo, essas amostras foram processadas por um moinho de martelo e peneiradas a uma granulometria entre 18 – 60 mesh para a sua utilização nas pirólises e para as caracterizações.

4.2 Análise Termogravimétrica (TGA) e Termogravimetria Derivada (DrTGA)

A análise termogravimétrica dos resíduos sólidos urbanos foi realizada em uma termobalança Shimadzu modelo DTG 60H. Utilizando-se cadinho de alumina (Al_2O_3), o forno é aquecido de 26 a 800°C com taxa de aquecimento de 10 °C/min sob atmosfera de gás nitrogênio.

4.3 Análise elementar

As análises de CHN são foram realizadas para todos os resíduos estudados, determinando a composição de carbono, hidrogênio e nitrogênio, podendo encontrar a composição de oxigênio por diferença. O equipamento usado é um Analisador Elementar da LECO Modelo CHN628 e os resultados tratados com o software CHN628 versão 1,30. O forno foi operado à temperatura de 950 °C. O equipamento foi calibrado com um padrão de EDTA (41,0% C, 5,5% H e 9,5% N).

4.4 Análise Imediata

A Análise Imediata da biomassa in natura foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 8112, com adaptações. Por meio desta análise, determinou-se o Teor de Umidade, Teor de Voláteis, Teor de Cinzas e, por diferença, o Teor de Carbono Fixo.

4.4.1 Teor de cinzas

O teor de cinzas aponta a quantidade de resíduo inorgânico na matéria após sua queima. Para a sua determinação, foram utilizados aproximadamente 5,0 g da amostra em quatro cadinhos de porcelana, sendo levadas ao forno mufla. Após atingir (525 ± 10) °C, as amostras ficaram no interior da mufla por um período de 4 horas. Em seguida, os cadinhos foram esfriados em dessecador com sílica gel aproximadamente por 40 minutos.

O teor de cinzas foi determinado pela Equação 1 (ABNT NBR 8112, 1986).

$$Tc(\%) = \frac{Mf - Mcad}{Mi} \cdot 100 \quad (1)$$

Sendo:

Tc - Teor de cinzas

Mi - Massa inicial

Mf - Massa final

Mcad – Massa do cadinho

4.4.2 Teor de voláteis

Para determinar o teor de material volátil, as amostras são submetidas à secagem em estufa (marca FANEM modelo Orion) a 105 °C durante 24h. Os cadinhos são calcinados em um forno mufla (EDG 3P S) à temperatura de 550°C por 1h, com taxa de aquecimento 50 °C/min, depois de atingirem temperatura ambiente no dessecador, pesa-

se os mesmos. Posteriormente, são pesados 0,5g da amostra e colocadas na mufla a 550 °C durante 30 min a taxa de aquecimento 30 °C/min.

O teor de voláteis é obtido pela equação 2 (ABNT NBR 8112, 1986):

$$T_{mv} (\%) = \frac{M_i - M_f}{M_f} \cdot 100 \quad (2)$$

Sendo:

T_{mv} – Teor de materiais voláteis

M_i - Massa inicial

M_f - Massa final

4.4.3 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo indica a fração de carbono que permanece na amostra mesmo após o aquecimento e foi determinado pela Equação 3 (ABNT NBR 8112, 1986).

$$TCF(\%) = 100 - T_u - T_c - T_{mv} \quad (3)$$

Sendo:

T_{cf} – Teor de carbono fixo

T_u - Teor de umidade

T_c - Teor de cinzas

T_{mv} - Teor de materiais voláteis

4.4.4 Teor de Umidade

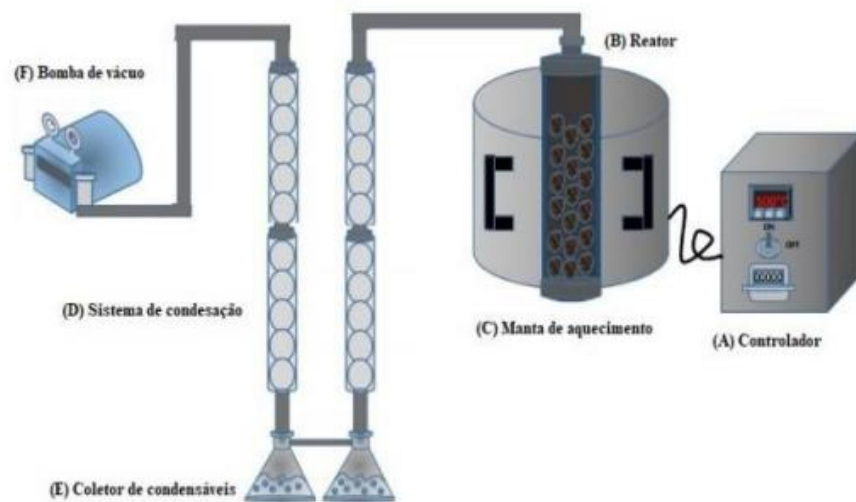
Determinada por uma abordagem termogravimétrica (TGA/DrTGA), ou seja, pela perda de massa na região de 100°C.

4.5 Pirólise

Para a pirólise, foi utilizado um forno tubular, modelo JUNG de 1KW (LT6 2010), disponível no Laboratório de Sistema de Separação e Otimização de Processos (LASSOP), operada à uma temperatura variável, de acordo com o resíduo estudado, com tempo de

residência de 30 min, taxa de aquecimento de 10 °C/min e temperatura de condensação de 4°C.

Figura 3 - Desenho esquemático da unidade de pirólise constituído por (A) Controlador de temperatura e taxa de aquecimento; (B) Reator de pirólise (C) Manta de aquecimento (D) Sistema de condensação em série; (E) Coletor do produto líquido da pirólise; (F) Bomba de vácuo.



Fonte: SANTOS, 2018.

Os rendimentos em biochar e bio-óleo são calculados conforme as equações abaixo:

$$\text{Rend. biochar (\%)} = \frac{M_f \text{ biochar}}{M_i \text{ biomassa}} \cdot 100 \quad (4)$$

Sendo:

MF biochar - Massa final do biochar

MI biomassa - Massa final da biomassa

$$\text{Rend. biochar (\%)} = \frac{M_f \text{ bio-óleo}}{M_i \text{ biomassa}} \cdot 100 \quad (5)$$

Sendo:

MF bio-óleo - Massa final do bio-óleo

MI biomassa - Massa final da biomassa.

4.6 Caracterização por GC/QMS

4.6.1 Preparo da amostra

Para que a amostra possa ser analisada, é necessário que passe pelo processo de extração líquido-líquido. São pipetados 2 mL do bio-óleo e 2 mL de diclorometano em um tubo, que é agitado para agilizar a separação da fase orgânica da aquosa. A fração aquosa é extraída e colocada em uma capela de exaustão para que seja pré-concentrada e, depois da sua evaporação, é colocado um pouco de diclorometano no tubo para a transferência do extrato para um vial de 1 mL, que será utilizado na análise cromatográfica por GC/QMS. O processo é realizado para cada bio-óleo gerado.

4.6.2 Análise cromatográfica

Após o processo de extração, para realizar as identificações dos compostos presentes na amostra, deve-se utilizar o equipamento de cromatografia gasosa acoplado a um detector de espectrometria de massas com analisador tipo quadrupolo, modelo GC/MS-QP2010 PLUS, da marca Shimadzu localizado no Laboratório de Pesquisa em Recursos Naturais (LPQRN) em um equipamento Shimadzu modelo QP2010Plus, utilizando uma coluna DB-5, com um comprimento de 60 m, diâmetro de 0,25 mm com thickness de 0,25 μ L. Sendo assim, deve-se encontrar todos os picos com o auxílio do software GCMS-Solution (Shimadzu). Dessa forma, o software sugere várias nomenclaturas que podem existir ou não, então a confirmação dos compostos é feita semi-qualitativamente, a partir da pesquisa de cada nomenclatura no site do NIST (National Institute of Standards and Technology), utilizando os espectros de massa como comparação (BISPO, 2018).

Além disso, também deve haver o cálculo do índice de retenção de cada composto, encontrado na equação 6, que auxilia na identificação dos compostos desconhecidos com os valores de referência, utilizando uma mistura padrão de n-Alcanos (Sigma-Aldrich C8 -C40).

$$IR = 100 * \left[\frac{t_c - t_n}{t_{n+1} - t_n} + n \right] \quad (6)$$

Sendo:

IR - índice de retenção;

t_c - tempo de retenção do composto de interesse;

t_{n+1} - tempo de retenção do hidrocarboneto posterior;

t_n - tempo de retenção do hidrocarboneto anterior;

n – nº de carbonos do hidrocarboneto anterior.

5. RESULTADOS

5.1. Propriedades físico-químicas dos componentes de RSU

5.1.1 Análise elementar (CHN) e imediata

As caracterizações dos cinco componentes de RSU são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise elementar e imediata das amostras de RSU.

Amostra	Análise elementar (%)				Análise imediata (%)			
	C	H	O	N	Umidade	Voláteis	Cinzas	CF
Papel	49,2	5,9	44,8	0,08	6,5	17,544	12,043	63,913
Papelão	49,33	7,94	41,99	0,49	7,57	6,159	4,974	81,296
Trapos	58,91	4,99	35,43	0,57	0,79	0,92 0	4,527	93,763

Fonte: AUTORA, 2024.

Na análise elementar, percebe-se um alto percentual de carbono em todas as biomassas, assim como uma quantidade considerável de hidrogênio, o que contribui para o poder calorífico dessas amostras, que apresentam grande valor energético. Além disso, há um alto teor de oxigênio no papel e papelão, que é em função da sua composição majoritária de celulose, hemicelulose e lignina, em comparação com a amostra de trapos, que é composta em sua maioria por poliéster (BIZERRA, 2017).

Na análise imediata, todas as amostras apresentaram o teor de umidade inferior a 10%, o que indica que são adequadas para esse tipo de processo termoquímico. A amostra de trapos apresentou um baixo teor de umidade em relação às demais biomassas, o que implica em um bio-óleo com menor quantidade de água e, portanto, menor volume total. (DOS SANTOS, 2014)

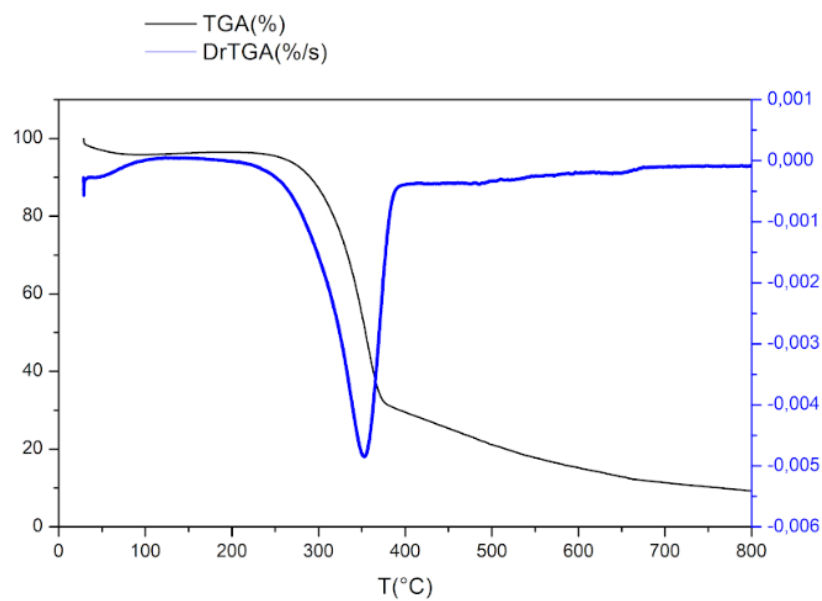
Os materiais voláteis expressam a facilidade de se queimar a biomassa utilizada, além do favorecimento da formação da fração líquida (bio-óleo), tendo destaque o alto teor da amostra de papel, em relação às demais, que se relaciona diretamente com a presença de material orgânico. Em relação ao teor de carbono fixo, quanto maior for esse percentual, mais lentamente o combustível irá queimar, o que justifica o maior tempo para decomposição gravimétrica da amostra de trapos, que apresentou um alto valor desse teor. (BIZERRA, 2017)

Ainda através da composição química imediata é possível perceber que o índice de carbono fixo e o de materiais voláteis são inversamente proporcionais, evidenciando a energia disponível liberada pela biomassa (MOULIN *et al.*, 2017).

5.1.2. Análise Termogravimétrica (TGA/DrTGA)

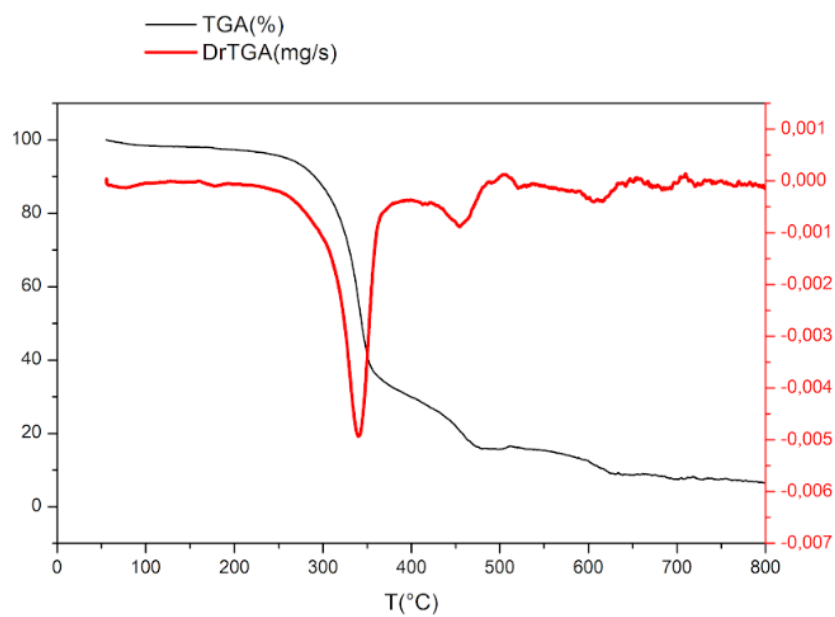
As figuras 4, 5, 6 e 7 a seguir relacionam as curvas de TGA/DrTGA (análise termogravimétrica e sua derivada) à temperatura de degradação em graus celsius de cada componente do RSU. A curva TGA indica a perda percentual de massa do composto, sendo sua derivada um aprimoramento que permite a visualização dos picos de degradação, isto é, em que faixa de temperatura os componentes principais de cada matéria prima se degradam e, também, onde há uma estabilização na perda de massa.

Figura 4 - Curvas TGA/DrTGA do Papelão.



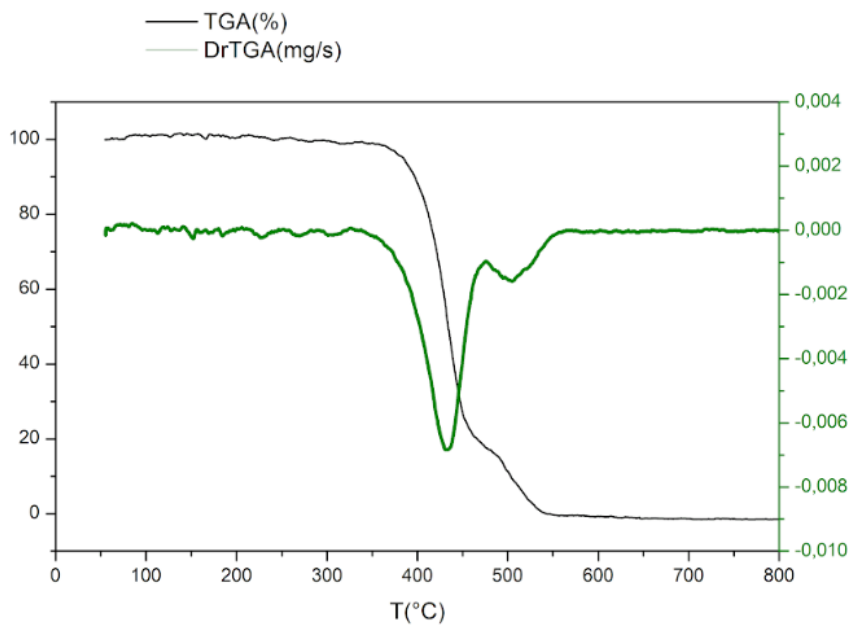
Fonte: AUTORA, 2024.

Figura 5 - Curvas TGA/DrTGA do papel.



Fonte: AUTORA, 2024.

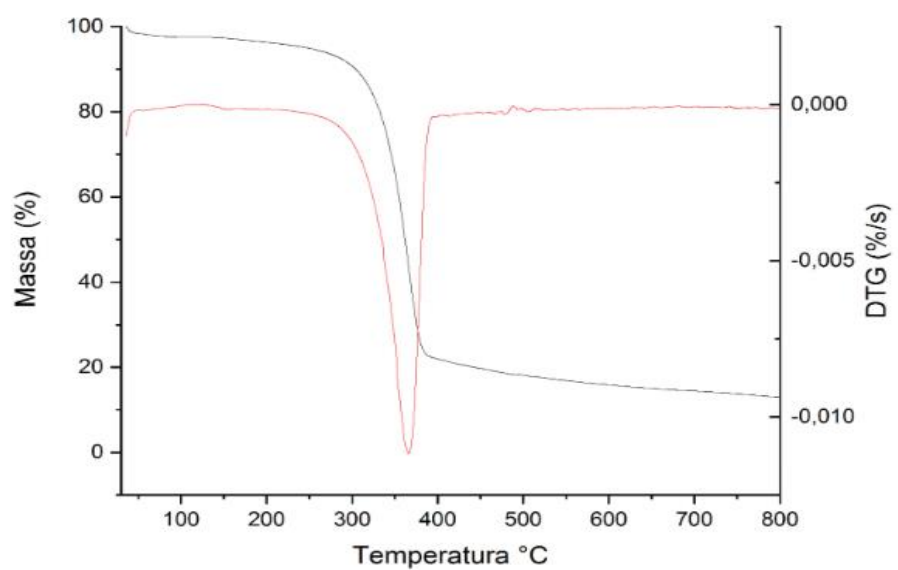
Figura 6 - Curvas TGA/DrTGA dos trapos de poliéster.



Fonte: AUTORA, 2024.

Para haver uma comparação entre o bio-óleo de dois tipos diferentes de trapos, também foi realizada a termogravimetria para trapos de algodão, a fim de se obter a temperatura ideal para realizar a sua pirólise.

Figura 7 - Curvas TGA/DrTGA dos trapos de algodão.



Fonte: AUTORA, 2024.

Identificando a degradação de massa em cada matéria, temos a sua faixa para cada componente demonstrados na tabela 2.

Tabela 2 - Características da análise termogravimétrica (TGA/DrTGA) dos componentes de RSU.

Componentes	Faixas de temperatura de perda de massa	Temperatura de degradação máxima
Papel	(225-400°C), (425-500°C), (570-650°C)	360°C
Papelão	(240-400°C)	355°C
Trapos (poliéster)	(375-475°C), (475-550°C)	440°C
Trapos (algodão)	(275-415°C)	365°C

Fonte: AUTORA, 2024.

De acordo com M. Sefain *et al.* (1984), o perfil de perda de massa de cada amostra pode ser classificado em três etapas distintas: a perda de massa ocasionada pela perda de umidade da matéria-prima (evaporação da água), a principal área de degradação do material atribuída a vaporização e eliminação dos compostos mais voláteis, e a zona de carbonização, onde há a transformação do biochar, de modo a se manter a perda de massa e a temperatura constantes e a curva DrTGA contínua.

O papel, papelão e os trapos foram compostos de apenas uma variação de matéria prima, justificando o menor número de picos. Com os dados dos gráficos obtidos, foi possível estipular temperaturas para a realização da pirólise, com base na estabilidade das curvas de DrTGA.

A curva DrTGA mostra dois picos do papel (Figura 5), sendo o maior em 340°C, e apenas um do papelão (Figura 4), em 355°C, e nos trapos de algodão (Figura 7), em 365°C os quais, nas três amostras, correspondem à hemicelulose, celulose e a lignina degradadas. Em conformidade com Qiao *et al.* (2018), o intervalo de temperatura em 240-370°C refere-se à decomposição da hemicelulose. Com o aumento da temperatura a celulose começou a decompor, como também a lignina nessa mesma fase devido a taxa de decomposição mais lenta. Constata-se um pico maior do papelão em confronto

com o papel, o que justifica uma maior reatividade para o papelão e, da mesma forma, verifica-se um pico maior dos trapos de algodão em relação ao papelão. Além disso, analisou-se um efeito sinérgico de degradação entre papel, trapos de algodão e papelão, ocorrendo entre 300-400°C das curvas TGA/DrTGA. Os trapos de poliéster (Figura 6) apresentaram dois picos, sendo o mais expressivo à 435°C, onde ocorre a cisão química e decomposição das cadeias do polímero.

5.2. Pirólise: produção do bio-óleo e biochar

Após a coleta, separação e secagem das amostras de RSU, foram realizadas as pirólises de cada um, utilizando 100g de matéria-prima. Para o tecido, optou-se por realizar a pirólise utilizando o material poliéster e algodão, para que houvesse um comparativo entre os bio-óleos. Considerando isso, os rendimentos totais obtidos estão apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 - Rendimentos obtidos durante a pirólise dos componentes de RSU.

Matéria	T(°C)	Rendimento (%)		Desvio Padrão (%)	
		Biochar	Bio-óleo	Biochar	Bio-óleo
Papel	650	30,033	39,533	5,394	5,879
Papelão	400	28,96	34,25	6,493	2,616
Trapos poliéster	550	19,05	14,15	1,061	1,626
Trapos algodão	450	17,2	38,7	-	-

Fonte: AUTORA, 2024.

Foram realizadas otimizações no sistema pirolítico, como a checagem da eficiência do vácuo em todos os pontos de possível falha, ou seja, as conexões do condensador e do balão volumétrico, assim como as borrachas de vedação. Além disso, houve a verificação da pressão da bomba de vácuo, para conseguir uma melhor eficiência do processo, conseguindo atingir 20 inHg.

De modo geral, evidenciou-se que o maior rendimento de bio-óleo, que é o produto de interesse do procedimento, e a maior produção de biochar foram dados pela pirólise de papel ($39,533 \pm 5,879$ de óleo e $30,033 \pm 5,394$ de biochar), enquanto o papelão possui produções um pouco menores de bio-óleo ($34,25 \pm 2,616$) e de biochar ($28,96 \pm$

6,493). Quando comparados aos resultados de Zhou *et al.* (2013), apresentam maiores rendimentos de bio-óleo e menores de biochar, tanto para o papel quanto para o papelão. Pelas características que ambos os óleos apresentaram, como uma baixa viscosidade, pôde-se perceber sua baixa perda pelo sistema pirolítico.

A pirólise dos trapos de poliéster ($14,15 \pm 1,626$ de óleo e $19,05 \pm 1,061$ de biochar) apresentaram baixo rendimento de óleo e carvão, decorrente das perdas de material pelo processo, haja vista a alta viscosidade do óleo obtido, que se impregnou pelo reator, condensador e demais componentes do sistema. Em comparação com Teixeira, J. (2019), foi um rendimento muito baixo, que não se assemelhou ao da literatura. Para haver comparação tanto do rendimento como da composição de trapos com diferentes materiais, foi realizada a pirólise utilizando trapos com material de algodão, apresentando um bom rendimento de 38,7% de bio-óleo e 17,2% de biochar, à uma temperatura de 450°C, que também se distancia da literatura, seguindo o trabalho de Czajczyńska, D. et al. (2017), que possui baixos rendimentos de bio-óleo. O bio-óleo proveniente dos trapos de algodão apresentam uma menor viscosidade, por conta do seu material ser composto majoritariamente de celulose, diferente do poliéster que, por ser um tipo de plástico, apresenta uma alta viscosidade quando pirolisado, por conta da polimerização.

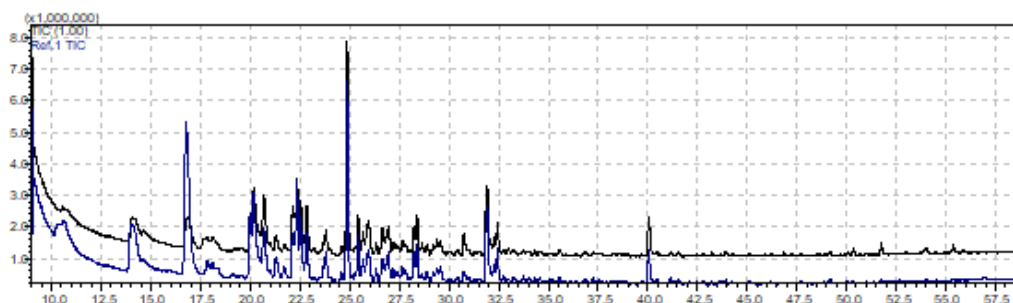
5.3. Caracterização por GC/qMS

Os bio-óleos produzidos foram caracterizados por GC/qMS utilizando uma abordagem semi-quantitativa e os constituintes foram identificados por similaridade e comparação dos espectros de massas obtidos com os fornecidos pela biblioteca do equipamento (NIST 08). Por conseguinte, ao finalizar as análises e todas as etapas do procedimento, foi possível obter os resultados das amostras de Papel, Papelão e Trapos a seguir.

5.3.1. Bio-óleo de Papel

A amostra de bio-óleo do papel foi analisada em duplicata e o cromatograma comparativo das duas amostras, como apresentado na Figura 8, mostrando uma grande quantidade de picos, que são indicativos da quantidade de cada composto.

Figura 8 – Cromatograma comparativo obtido por GC/MS das amostras de bio-óleo de papel.



Fonte: AUTORA, 2024.

Sendo assim, com base na comparação com os índices de retenção encontrados e os da literatura, foi possível identificar os compostos presentes em cada pico, podendo ser vistos nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Análise da primeira amostra de bio-óleo proveniente do papel.

Pico	Nomeclatura	Tempo de retenção	Índice de Retenção	Área (%)
1	Ácido propanoico, éster de 1-metilpropilo	18.100	867	2.53
2	2(5H)-Furanona	20.170	913	4.48
3	2-hidroxi-2-Ciclopenten-1-ona	20.695	926	5.74
4	5-metil-2(5H)-furanona	21.275	939	1.54
5	5-metil-2-furanocarboxaldeído	22.360	965	0.77
6	3-metil-2-Ciclopenten-1-ona	22.535	969	3.66
7	Fenol	22.845	976	3.47
8	2-hidroxi-3-metil-2-Ciclopenten-1-ona	24.875	1.027	02.08
9	2,3-dimetil-2-Ciclopenten-1-ona	25.425	1.041	15.41
10	3-(1-metiletil)-2-Ciclopenten-1-ona	26.325	1.065	1.43
11	2-metil-Fenol	26.640	1.073	0.83
12	Maltol	28.245	1.116	0.91
13	Ácido benzóico	29.570	1.154	0.57
14	1,2-Benzenodiol	30.750	1.188	0.93

15	Ácido pentadecanóico, éster etílico	51.765	1.875	0.52
----	-------------------------------------	--------	-------	------

Fonte: AUTORA, 2024.

Tabela 5 - Análise da segunda amostra de bio-óleo proveniente do papel.

Pico	Nomeclatura	Tempo de retenção	Índice de Retenção	Área (%)
1	tetrahidro-Furano	17.815	860	1.16
2	2-metil-2-Ciclopenten-1-ona	19.986	909	4.27
3	2(5H)-Furanona	20.166	913	5.61
4	2-hidroxi-2-Ciclopenten-1-ona	20.694	926	3.45
5	5-metil-2(5H)-furanona	21.265	939	1.67
6	5-metil-2-furanocarboxaldeído	22.355	965	3.15
7	3-metil-2-Ciclopenten-1-ona	22.535	969	2.96
8	Fenol	22.831	976	2.77
9	2-hidroxi-3-metil-2-Ciclopenten-1-ona	24.872	1027	9.77
10	2,3-dimetil-2-Ciclopenten-1-ona	25.421	1041	1.69
11	3-(1-metiletil)-2-Ciclopenten-1-ona	26.319	1065	0.63
12	2-metil-Fenol	26.636	1073	1.59
13	Furil hidroximetil cetona	27.194	1088	0.38
14	Maltol	28.246	1117	1.37
15	Ácido benzoico	29.564	1154	0.85
16	1,2-Benzenodiol	30.744	1188	0.94
17	5-(hidroximetil)-2-furanocarboxaldeído	32.305	1235	6.50
18	2,3-di-hidro-1H-Inden-1-ona	34.343	1298	0.22
19	1,6-anidro-beta.-D-Glucopirranose	40.057	1496	1.94

Fonte: AUTORA, 2024.

Os compostos 2,3-dimetil-2-Ciclopenten-1-ona, 1,2-Benzenodiol, 3-metil-2-Ciclopenten-1-ona, Fenol e 3-metil-2-Ciclopenten-1-ona foram encontrados também por W. Charusiri (2015).

A partir das tabelas e figura acima, foi possível notar que 13 compostos se repetiram, sendo eles 2(5H)-furanona; 2-hidroxi-2-Ciclopenten-1-ona; 5-metil-2-furancarboxaldeído; 3-metil-2-Ciclopenten-1-ona; Fenol; 2-hidroxi-3-metil-2-

Ciclopenten-1-ona; 2,3-dimetil-2-Ciclopenten-1-ona; 3-(1-metiletil)-2-Ciclopenten-1-ona; 2-metil-Fenol; Maltol; Ácido benzóico e 1,2-Benzenodiol.

Dessa forma, com base nessas informações e selecionando os cinco compostos majoritários, é possível identificar a aplicação de cada composto. Sendo assim, o primeiro é o Fenol, um composto que pode ser utilizado na cicatrização de unhas encravadas, podendo ter um uso na área farmacêutica (VALLEJO, et. al. 2012). Além disso, o Fenol é um composto de extrema importância para a indústria em geral por ser a base de petróleo e seus derivados (BU, et. al., 2011). Também é utilizado na fabricação de pesticidas, explosivos, drogas e corantes, na agricultura como herbicida, inseticida e fungicida, e no processo de branqueamento da fabricação de papel (MC MURRY, 2005).

O Maltol possui um cheiro bastante característico por ser doce e isso faz com que ele tenha aplicação em fragrâncias e potencializadores de sabores, e, também, são usados como conservantes de alimentos e antioxidantes naturais (ZOU, et. al., 2022).

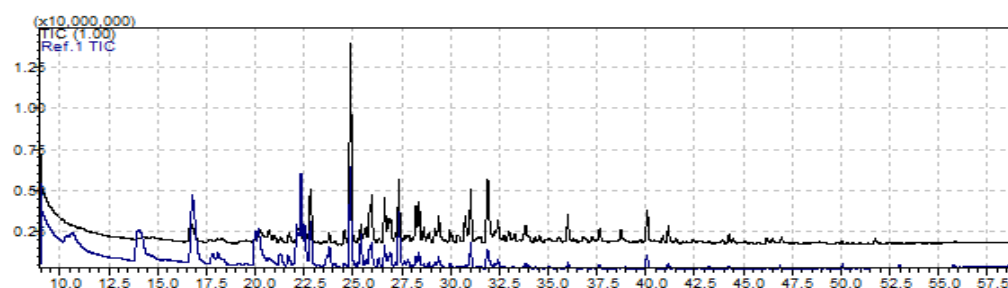
O 2-hidroxi-3-metil-2-Ciclopenten-1-ona, ou Hmcp (sigla em inglês), é conhecido por ser um bom quelante monoaniônico e bidentado, ele pode ser aplicado na indústria alimentícia, farmacêutica e de cosméticos (ZBORWSKI, 2012).

A 2(5H)-Furanona é um composto que tem sido utilizado no tratamento do câncer por conta da sua notável bioatividade (WEI, 2018). E o ácido benzoico tem aplicação na indústria de cosméticos, onde atua no ajuste de pH e também como conservante (International Journal of Toxicology, 2001).

5.3.2. Bio-óleo de Papelão

Assim como apresentado no cromatograma do papel, o cromatograma comparativo do papelão mostra uma quantidade considerável de picos, como pode ser visualizado na Figura 9. Nesse sentido, apenas analisando o cromatograma já é possível concluir que o rendimento foi superior ao do papel. Nas tabelas 6 e 7 estão os compostos encontrados nas duas amostras analisadas separadamente.

Figura 9 – Cromatograma comparativo obtido por GC/MS das amostras de bio-óleo de papelão.



Fonte: AUTORA, 2024.

Tabela 6 – Análise da primeira amostra de bio-óleo proveniente do papelão.

Pico	Nomeclatura	Tempo de retenção	Índice de Retenção	Área (%)
1	2-furanometanol	17.670	857	0.67
2	2(5H)-Furanona	20.215	914	1.49
3	2-hidroxi-2-Ciclopenten-1-ona	20.700	926	1.51
4	5-metil-2(5H)-furanona	21.290	940	1.04
5	3,3-dimetil-2-butanona	22.135	960	4.10
6	3-metil-2-Ciclopenten-1-ona	22.550	969	1.49
7	Fenol	22.830	976	7.35
8	2-hidroxi-3-metil-2-Ciclopenten-1-ona	24.885	1027	22.48
9	2,3-dimetil-2-Ciclopenten-1-ona	25.420	1041	1.54
10	2-metil-Fenol	26.635	1073	5.23
11	2-metoxi-Fenol	27.360	1092	6.59
12	Maltol	28.235	1116	3.77
13	3-etil-2-hidroxi-2-Ciclopenten-1-ona	29.220	1144	1.73
14	2,3-dimetil-Fenol	29.405	1150	2.98
15	4-etil-Fenol	29.965	1166	1.35
16	3-Nonen-1-ol, (Z)-	30.080	1169	0.67
17	1,2-Benzenodiol	30.755	1188	3.42
18	2-metoxi-4-metil-Fenol	31.040	1196	6.00

Tabela 6 – Análise da primeira amostra de bio-óleo proveniente do papelão.

19	5-(hidroximetil)-2-furanocarboxaldeído	31.915	1223	11.44
20	3-metoxi-1,2-Benzenodiol	33.300	1266	1.06
21	4-etil-2-metoxi-Fenol	33.850	1283	3.92
22	2,3-di-hidro-1H-Inden-1-ona	34.330	1298	0.63
23	2,6-dimetoxi-Fenol	36.010	1354	2.68
24	Vanilina	37.650	1410	2.00
25	3,4-dimetoxi-Benzenometanol	38.745	1449	1.17
26	4-hidroxi-3-metoxi- éster metílico Ácido benzóico	40.875	1527	0.73
27	1-(4-hidroxi-3-metoxifenil)-2-Propanona	41.165	1538	1.95
28	4-hidroxi-3-metoxi-Ácido benzenoacético	44.275	1646	1.01

Fonte: AUTORA, 2024.

Tabela 7 – Análise da segunda amostra de bio-óleo proveniente do papelão.

Pico	Nomeclatura	Tempo de retenção	Índice de Retenção	Área (%)
1	tetrahidro-Furano	17.820	860	3.14
2	2-metil-2-Ciclopenten-1-ona	19.990	909	7.77
3	2(5H)-Furanona	20.165	914	10.22
4	5-metil-2(5H)-furanona	21.280	939	3.29
5	5-metil-2-furanocarboxaldeído	22.350	965	10.97
6	3-metil-2-Ciclopenten-1-ona	22.520	976	6.89
7	Fenol	22.835	976	9.32
8	2-hidroxi-3-metil-2-Ciclopenten-1-ona	24.870	1027	17.57
9	2,3-dimetil-2-Ciclopenten-1-ona	25.420	1041	4.82
10	2-metil-Fenol	26.630	1073	4.86
11	2-metoxi-Fenol	27.360	1092	8.84

12	3-etil-2-hidroxi-2-Ciclopenten-1-ona	27.635	1099	0.57
13	Maltol	28.245	1116	1.29
14	2,5-dimetil-Fenol	29.395	1149	2.25
15	2-metoxi-4-metil-Fenol	31.035	1196	4.62
16	4-etil-2-metoxi-Fenol	33.850	1283	0.97
Tabela 7 – Análise da segunda amostra de bio-óleo proveniente do papelão.				
17	2,6-dimetoxi-Fenol	36.015	1354	0.88
18	Vanilina	37.645	1409	0.81
19	1-(4-hidroxi-3-metoxifenil)-2-Propanona	41.155	1537	0.92

Fonte: AUTORA, 2024.

Os compostos 2-hidroxi-2-Ciclopenten-1-ona, fenol, 2-hidroxi-3-metil-2-Ciclopenten-1-ona, 2-metoxi-Fenol, 3-etil-2-hidroxi-2-Ciclopenten-1-ona e 4-etil-2-metoxi-Fenol foram encontrados nos resultados de F. Sotoudehnia *et al* (2019), com condições de pirólise e análise bem similares, além da mesma biomassa.

A partir das tabelas e figuras acima, foi possível notar que quinze compostos em comum foram encontrados, sendo eles 2(5H)-furanona; 5-metil-2(5H)-furanona; 3-metil-2-Ciclopenten-1-ona; Fenol; 2-hidroxi-3-metil-2-Ciclopenten-1-ona; 2,3-dimetil-2-Ciclopenten-1-ona; 2-metil-Fenol; 2-metoxi-Fenol; Maltol; 3-etil-2-hidroxi-2-Ciclopenten-1-ona; 2-metoxi-4-metil-Fenol; 4-etil-2-metoxi-Fenol; 2,6-dimetoxi-Fenol; Vanilina; 1-(4-hidroxi-3-metoxifenil)-2-Propanona.

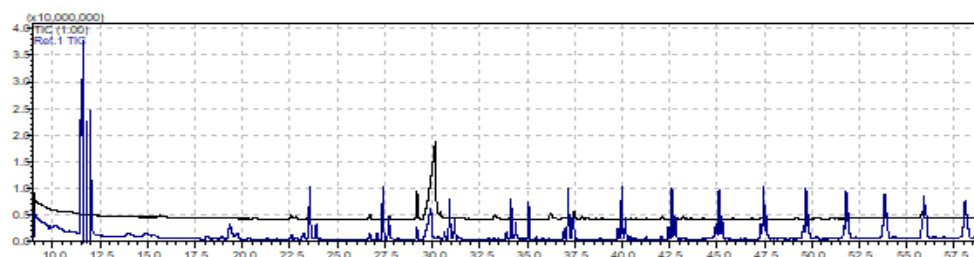
Entre os 15, 4 majoritários foram os mesmos já expostos anteriormente ao falar sobre o papel, que foram o fenol, maltol, 2-hidroxi-3-metil-2-Ciclopenten-1-ona e 2(5H)-furanona.

Além disso, a Vanilina, um dos compostos majoritários encontrados, que tem uma grande importância na indústria, sendo o segundo agente aromatizante mais popular depois do açafrão e possuindo uma vasta aplicação, que vai de aromatizantes a produtos de uso pessoal (BANERJEE, 2018). Ademais, sua aplicação é na indústria farmacêutica, alimentícia e de cosméticos (PRIEFERT, 2001).

5.3.3. Bio-óleo de Trapos

Na comparação entre os cromatogramas dos trapos de poliéster e algodão pôde-se perceber, ao visualizar a Figura 10, que as duas possuem muitas diferenças, em que a amostra de poliéster (em preto) possui menos picos do que a amostra de algodão (em azul). Apenas utilizando o fator visual, os trapos de algodão apresentam mais compostos e poderiam ser mais vantajosos em relação aos outros.

Figura 10 – Cromatograma comparativo obtido por GC/MS das amostras de bio-óleo de trapos de poliéster e de algodão.



Fonte: AUTORA, 2024.

As amostras de bio-óleo dos dois tipos de trapos foram analisadas, tendo sua composição apresentada nas Tabelas 8 e 9 a seguir.

Tabela 8 – Análise da amostra de bio-óleo proveniente de trapos de poliéster.

Pico	Nomeclatura	Tempo de retenção	Índice de Retenção	Área (%)
1	3-metoxi-1-butanol	15.685	813	2.13
2	Benzaldeído	22.580	970	1.29
3	Fenol	22.830	976	0.77
4	Benzonitrila	23.455	991	0.57
5	Acetofenona	26.710	1075	1.25
6	Ácido benzóico, éster metílico	27.765	1103	0.59
7	Ácido benzóico	30.155	1171	71.25
8	Ácido benzóico, éster etílico	30.430	1179	1.66
9	Bifenil	37.465	1403	2.20
10	Dietilftalato	43.225	1613	0.48
11	9H-Fluoren-9-ona	47.335	1740	0.31
12	1-Heptadeceno	47.480	1745	0.14

13	Ácido pentadecanóico, éster etílico	51.765	1875	0.28
----	-------------------------------------	--------	------	------

Fonte: AUTORA, 2024.

Como pode ser observado, o Ácido Benzoico possui o maior pico e, consequentemente, é o composto majoritário dessa amostra, e pode ser usado como conservante em alimentos e bebidas, em cosméticos, medicamentos, e nas produções de fenol, plastificantes e nylon (OLIVEIRA e REIS, 2017).

O Fenol e o Bifenil são alguns dos compostos majoritários que compõem o bio-óleo, resultado também encontrado por Goltz *et al* (2017). Outros compostos majoritários encontrados foram o Benzaldeído e Acetofenona.

O Bifenil é um composto conhecido na indústria por ser um composto tóxico de origem industrial e um dos principais poluentes do mundo (FURUKAWA, 2004). Essa informação faz com que haja mais cuidado ao se trabalhar com o bio-óleo proveniente de materiais derivados do plástico, como é o caso do poliéster.

O Benzaldeído pode ser utilizado na indústria de cosméticos, por ser um agente aromatizante e ele também é um aditivo alimentar utilizado nos Estados Unidos. Diferentemente do Bifenil, é muito difícil ocorrer alguma irritação ao ter contato com o composto (International Journal of Toxicology, 2006).

A Acetofenona é muito utilizada em sínteses de compostos heterocíclicos e tem uma fácil comercialização (ZIARANI, 2020).

Tabela 9 – Análise da amostra de bio-óleo proveniente de trapos de algodão.

Pico	Nomeclatura	Tempo de retenção	Índice de Retenção	Área (%)
1	Ácido 2-propenoico, 2-metil-, éster metílico	11.480	712	7.86
2	Ácido 2-propenoico, 2-metil-, éster metílico	11.600	715	10.23
3	Ácido 2-propenoico, 2-metil-, éster metílico	11.790	720	1.13
4	Ácido 2-propenoico, 2-metil-, éster metílico	11.980	724	6.40
5	1-Nonene	19.330	894	2.40
6	1-Decene	23.550	993	4.12
7	Ácido benzoico	29.925	1164	6.39

8	1-Dodeceno	30.915	1193	2.49
9	9-Decen-1-ol	33.915	1285	0.51
10	1-Trideceno	34.160	1293	2.47

Tabela 9 – Análise da amostra de bio-óleo proveniente de trapos de algodão.

11	1-Pentadeceno	39.985	1493	3.32
12	1-Hexadeceno	42.625	1593	3.22
13	9-Tetradecen-1-ol, (E)-	44.950	1666	0.62

Fonte: AUTORA, 2024.

Além do ácido benzoico, que também é encontrado no bio-óleo de J. A. Teixeira (2019), possuindo uma biomassa similar, composta por viscose e poliéster, a amostra de tecido de algodão possui muitos hidrocarbonetos, sendo a maioria alcenos, influenciando em seu poder calorífico e, conseqüentemente, no seu uso como biocombustível para geração de energia. O Ácido 2-propenoico, 2-metil-, éster metílico, também chamado de Metil Metacrilato, compõe grande parte do cromatograma, e é um monômero utilizado na produção de resinas polimetacrílicas, e também na impregnação do concreto, porém apresenta toxicidade ao ser humano (CETESB). Sua presença nesse tipo de biomassa significa uma possível contaminação ou uma fração da composição dos trapos de algodão ser de outro componente.

Sendo assim, mesmo o cromatograma do tecido de algodão ter sido mais volumoso (em relação a quantidade de picos), na validação e como mostrado nas tabelas, ela apresenta menos compostos que o de poliéster.

5.3.4. Uso como biocombustível

Quase todas as amostras possuem ácidos carboxílicos, que é resultado da degradação térmica da hemicelulose, destacando-se as amostras de trapos, com porcentagens significativas desses compostos, que são responsáveis pelo baixo poder calorífico, corrosividade e instabilidade dos bio-óleos (KRUTOF e HAWBOLDT, 2016).

A composição de todos os bio-óleos gerados possui uma grande variabilidade de compostos, o que os torna instáveis e viscosos, além de possuírem baixa volatilidade e possível formação de coque, também pela presença de muitos compostos oxigenados,

sendo indispensável o seu tratamento para que seja viável como biocombustível, como a hidrodessoxigenação, que é um processo utilizando catalizadores para o hidrotratamento do bio-óleo, com o objetivo de o tornar rico em hidrocarbonetos (MORAES, 2012).

Também há a possível utilização dos bio-óleos na realização de misturas ou emulsões estáveis com combustíveis fósseis, gasolina ou óleo diesel, permitindo assim que sejam utilizados em motores (GUEDES *et al.*, 2010).

6. CONCLUSÕES

Pela análise dos resultados obtidos, conclui-se que o tratamento de resíduos sólidos urbanos, proveniente do processo de pirólise, pode ser considerado uma alternativa tecnológica rentável, uma vez que influencia na redução de lixo gerado, na valorização e recuperação desses resíduos, além de contribuir na produção de uma possível fonte de energia renovável. Desse modo, o processo é considerado eficaz e de baixo custo para minimizar a poluição ambiental causada pelo descarte inadequado de seus resíduos.

O bio-óleo de papel apresentou o maior rendimento médio, com $39,533 \pm 5,879$ g, e é composto principalmente de cetonas, aldeídos e ácidos carboxílicos, destacando-se a 2(5H) - furanona e o Fenol. Já o bio-óleo de papelão teve um rendimento um pouco menor, de $34,25 \pm 2,616$ g, com composição considerável de fenóis e cetonas. Além disso, o bio-óleo de trapos de poliéster teve um baixo rendimento de $14,15 \pm 1,626$, sendo composto por ésteres, cetonas e ácidos carboxílicos, e o de trapos de algodão obteve um rendimento satisfatório de 38,7 g, com composição majoritária de hidrocarbonetos e ácidos carboxílicos, o que o torna uma boa escolha para utilização como biocombustível, haja vista as grandes quantidades de alcenos.

Contudo, é indispensável o tratamento do bio-óleo para a separação e extração dos compostos orgânicos desejados, e seus direcionamentos adequados para diversos setores na indústria química e na área agrícola, tendo em vista que as funções oxigenadas diminuem o poder calorífico e o desempenho do bio-óleo em sua utilização como biocombustível. Dessa forma, seriam necessários estudos específicos subsequentes acerca da viabilização o uso do potencial desse produto e seus compostos de interesse.

7. REFERÊNCIAS

3 milhões de toneladas de papelão são produzidas anualmente. Trashin, 2023. Disponível em: < <https://trashin.com.br/papelao/>>

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Carvão Vegetal – Análise imediata.** Método de ensaio. 01.040 – NBR 8112 OUT/1986. Origem: MB-1857/86. CB-1 – Comitê Brasileiro de Mineração e Metalurgia. CE-1:21.01-Comissão de Estudo de Carvão Vegetal, 5p.

AL-RUBAYE, A. F., HAMEED, I. H., KADHIM, M. J. **A Review: Uses of Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) Technique for Analysis of Bioactive Natural Compounds of Some Plants.** International Journal of Toxicological and Pharmacological Research; 9(1); 81-85, 2017. doi: 10.25258/ijtpr.v9i01.9042

BACKER, H., & HOLLOWELL, J. **Use of iodine for water disinfection: iodine toxicity and maximum recommended dose.** Environmental Health Perspectives, 108(8), 679–684, 2000. doi:10.1289/ehp.00108679

BANERJEE, G., CHATTOPADHYAY, P. **Vanillin biotechnology: the perspectives and future.** Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018. doi:10.1002/jsfa.9303
BELGIORNO, V. et al. **Energy from gasification of solid wastes.** Waste Management, v. 23, n. 1, p. 1-15, 2003. ISSN 0956-053X.

BEZERRA, J. **Gestão de resíduos em AL envolve descarte em aterro e coleta seletiva.** Gazeta de alagoas, 2022. Disponível em: <https://d.gazetadealagoas.com.br/cidades/349693/gestao-de-residuos-em-al-envolve-descarte-em-aterro-e-coleta-seletiva>

BISPO, M. D. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais de coco e de café através da pirólise: caracterização da fração líquida e aplicação analítica do biochar do coco.** Tese (Doutorado em Biotecnologia). 149p. Universidade Tiradentes – UNIT, 2018

BIZERRA, D. A. U. B. **Avaliação da palha de carnaúba in natura e carbonizada para produção de combustíveis sólidos: análise imediata, poder calorífico e densificação da biomassa.** TCC (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 62, 2017.

Brasil recicla apenas 20% dos resíduos têxteis que produz. CicloVivo, 2023. Disponível em: <<https://ciclovivo.com.br/planeta/desenvolvimento/brasil-recicla-apenas-20-dos-residuos-texteis-que-produz/>>

BRIDGWATER, A. V. **Review of Fast Pyrolysis of Biomass and Product Upgrading.** Biomass Bioen., 38, 68–94, 2012.

BU, Q. et al. **Phenol and phenolics from lignocellulosic biomass by catalytic microwave pyrolysis.** Bioresource Technology, 102(13), 7004–7007, 2011. doi:10.1016/j.biortech.2011.04.025

CETESB. **Ficha de Informação de Produto Químico – Metacrilato de Metila.** Disponível em: <[https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=META CRILATO%20DE%20METILA](https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=META%20CRILATO%20DE%20METILA)>. Acesso em: 9 fev. 2024.

CHARUSIRI, W. **Fast Pyrolysis of Residues from Paper Mill Industry to Bio-oil and Value Chemicals: Optimization Studies,** Energy Procedia, v. 74, p. 933-941, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.724>.

CHEN, Z., NIU, B., ZHANG, L., XU, Z. **Vacuum pyrolysis characteristics and parameter optimization of recycling organic materials from waste tantalum capacitors.** Journal of Hazardous Materials, 342, 192–200, 2018. doi:10.1016/j.jhazmat.2017.08.02

CZAJCZYŃSKA, D. et al. **Potential of pyrolysis processes in the waste management sector.** Thermal Science and Engineering Progress, 3, 171–197, 2017. DOI: 10.1016/j.tsep.2017.06.003.

DE MORAES, L. C. R et al. **Processo pirólise para decomposição do lixo urbano**. Revista Pesquisa e Ação, vol.1, n.1, 2015.

Descubra o tempo de decomposição do papel na natureza. Pensamento Verde, 2018. Disponível em: < <https://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/descubra-o-tempo-de-decomposicao-do-papel-na-natureza/>>

DOS SANTOS, C. E. **Potencial de desenvolvimento de biocombustível produzido a partir de bio-óleo da pirólise de papel moeda descartado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, p. 89, 2014.

FILHO, R. C. S. *et al.* **O aproveitamento de resíduos sólidos urbanos, por meio do processo de compostagem aeróbia enriquecida com casca de sururu para aproveitamento na construção civil**. Ciências exatas e tecnológicas, v. 4, n. 2, p. 125-134, Alagoas, 2017.

Final Report on the Safety Assessment of Benzaldehyde¹. International Journal of Toxicology, 25(1_suppl), 11–27, 2006. doi:10.1080/10915810600716612

Final Report on the Safety Assessment of Benzyl Alcohol, Benzoic Acid, and Sodium Benzoate. International Journal of Toxicology, 20(3_suppl), 23–50, 2001. doi:10.1080/10915810152630729

FURUKAWA, K., SUENAGA, H., GOTO, M. **Biphenyl Dioxygenases: Functional Versatilities and Directed Evolution**. Journal of Bacteriology, 186(16), 5189–5196, 2004. doi:10.1128/jb.186.16.5189-5196.2004

GONÇALVES, E. **80 milhões de toneladas de resíduos são produzidos no país a cada ano**. Radio agência nacional, 2021. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/meio-ambiente/audio/2021-08/80-milhoes-de-toneladas-de-residuos-sao-produzidos-no-pais-cada-ano>>. Acesso em: 24 de março de 2022.

GOUVEIA, N. **Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social.** Ciência & saúde coletiva, v. 17, n. 6, p. 1503-1510, 2012.

GUEDES, C. L. B. et al. **Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina.** Química Nova, v. 33, n. 4, p. 781–786, 2010.

HU, X.; GHOLIZADEH, M. **Progress of the applications of bio-oil.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134p, 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110124.

ISLAM, M. S. *et al.* **Production of bio-oil from municipal solid waste by pyrolysis.** Bangladesh journal of scientific and industrial research, v. 45, n. 2, p. 91-94, 2010.

KRUTOF, A; HAWBOLDT, K. **Blends of pyrolysis oil, petroleum, and other bio-based fuels: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 59, p. 406–419, 2016.

MA, W. et al., **Pyrolysis of typical MSW components by Py-GC/MS and TG-FTIR.** Fuel, China, Volume 251, 693-708, 2019. ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.069>.

MC MURRY, J. **Química Orgânica.** 6ª ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2005.

MISKOLCZI, N., BARTHA, L., DEÁK, G., JÓVER, B. **Thermal degradation of municipal plastic waste for production of fuel-like hydrocarbons.** Polymer Degradation and Stability, 86(2), 357–366, 2004. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2004.04.025

MORAES, M. S. A. **Avaliação da composição química de bio-óleos de pirólise de diferentes biomassas utilizando a cromatografia gasosa monodimensional e a**

bidimensional abrangente. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MOULIN, J. C. et al. **Effect of extractives and carbonization temperature on energy characteristics of wood waste in amazon rainforest.** CERNE, v. 23, n. 2, p. 209-218, 2017. DOI: 10.1590/01047760201723022216.

NASCIMENTO, J. S. **Caracterização e melhoramento de bio-óleo proveniente de semente de goiaba-*Psidium guajava* L.** Tese (doutorado em Biotecnologia) – Rede Nordeste de Biotecnologia – RENORBIO, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2016.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; AMPESSAN, C. G. M.; FRIEDERICH, G. **Biomassa residual agrícola e florestal na produção de compactados para geração de energia.** Revista de Ciências Agroveterinárias, Lages, v. 16, n. 2, p. 155-164, 2017. DOI: 10.5965/223811711622017155

OLIVEIRA, P. H. R.; REIS, R. R. **Ácido Benzoico (CAS 65-85-0).** Rev. Virtual de Química, 9 (6), p. 2673-2687, 2017.

PEDROZA, M. M et al. **Aproveitamento energético de Resíduos Sólidos Urbanos em processo de pirólise.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, v.6, n.2, p. 184-207, 2017

PRIEFERT, H., RABENHORST, J., STEINBÜCHEL, A. **Biotechnological production of vanillin.** Applied Microbiology and Biotechnology, 56(3-4), 296–314, 2001. doi:10.1007/s002530100687

QIAO, Y. et al. **Pyrolysis Characteristics and Kinetics of Typical Municipal Solid Waste Components and Their Mixture: Analytical TG-FTIR Study.** Energy & Fuels, 32 (10), 10801-10812, 2018. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b02571.

RANA, S.; GUPTA, S.; RANA, A.; BHUSHAN, S. **Functional properties, phenolic constituents and antioxidant potential of industrial apple pomace for utilization as active food ingredient.** Food Sci. H. Wellness, 4, 180-187, 2015.

SANTOS, K. J. L. **Produção, caracterização e aplicação como agente adsorvente do biocarvão obtido a partir da *Syagrus oleracea* e *Wodyetia bifurcata*.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

SEFAIN, M. Z.; EL-KALYOUNI, S. F. **Thermogravimetric Studies of Different Celluloses.** Thermoch. Acta, 75, 107-113, 1984.

SILVA, C. O.; KONRAD, O.; CALLADO, N. H.; ARAUJO, L. G. S.; HASAN, C. **Resíduos sólidos urbanos de Maceió/AL: análise da composição gravimétrica sob influências sazonais.** Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.11, n.3, p.426-439, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.003.0033>

SILVEIRA, P. D. **Avaliação do potencial da pirólise de resíduos sólidos urbanos como processamento termoquímico para recuperação de matéria e energia.** Monografia (Graduação) – Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Londrina, 2015.

SOARES T. S.; CARNEIRO A. C. O.; GONÇALVES E. O.; LELLES J. G. **Uso da Biomassa Florestal na Geração de Energia.** Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal, Número 8, Publicação Científica Da Faculdade De Agronomia e Engenharia Florestal De Garça/ FAEF, ISSN 1678-3867, 2006

SOTOUDEHNIA, F. *et al.* **Characterization of bio-oil and biochar from pyrolysis of waste corrugated cardboard.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 104722. 2019. doi:10.1016/j.jaap.2019.104722

TEIXEIRA, J. A. **Análise prática da pirólise de resíduos têxteis compostos de viscose e poliéster para obtenção de carvão e bio-óleo em reator de leito fixo sem fluxo de gás.** Tese (Doutorado em Tecnologia ambiental). Universidade de Ribeirão Preto, 2019.

VALADÃO, L. et al. **Estudo comparativo dos bio-óleos obtidos por pirólises rápida e lenta do caroço de pêssgo**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 26, p. 757–764, 11 out. 2021. DOI: 10.1590/S1413-415220200077

VALLEJO, R. B. B., Losa Iglesias, M. E., Viejo Tirado, F., & Serrano Pardo, R. **Cauterization of the germinal nail matrix using phenol applications of differing durations: A histologic study**. Journal of the American Academy of Dermatology, 67(4), 706–711, 2012. doi:10.1016/j.jaad.2012.05.002

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

WEI, M. X. et al. **Synthesis and biological activities of dithiocarbamates containing 2(5H)-furanone-piperazine**. European Journal of Medicinal Chemistry, 155, 165–170, 2018. doi:10.1016/j.ejmech.2018.05.056

ZBOROWSKI, K. K., GRYBOS, R., WESEŁUCHA-BIRCZYŃSKA, A., Kim, Y., PRONIEWICZ, L. M. **Quantum mechanical study of the tautomerism and molecular spectra of 2-hydroxy-3-methyl-2-cyclopenten-1-one**. Molecular Physics, 110(6), 343–351, 2012. doi:10.1080/00268976.2011.646336

ZHOU, C., YANG, W., BLASIAK, W. **Characteristics of waste printing paper and cardboard in a reactor pyrolyzed by preheated agents**. Fuel Processing Technology, Volume 116, 2013, Pages 63-71. ISSN 0378-3820. DOI: 10.1016/j.fuproc.2013.04.023.

ZIARANI, G. M., KHEILKORDI, Z., MOHAJER, F. **Recentes avanços na aplicação de acetofenona na síntese de compostos heterocíclicos**. J IRAN CHEM SOC 17, 247-282, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13738-019-01774-4>

ZOU, P. et al. **Hide details: A Study on the Release Behavior of Ethyl Maltol During Pyrolysis of its Metal Complexes**. Thermochemica Acta. doi: 10.1016/j.tca.2022.179323.