



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA – UFPB



CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS – PPGER

SAHYONARA ESTRELA DE LACERDA HUSSEIN MÉLO

**CONVERSÃO TÉRMICA DOS RESÍDUOS URBANOS COMO
ALTERNATIVA ENERGÉTICA PARA O ENCERRAMENTO DOS LIXÕES
DA PARAÍBA**

JOÃO PESSOA - PB

2021

SAHYONARA ESTRELA DE LACERDA HUSSEIN MÉLO

**CONVERSÃO TÉRMICA DOS RESÍDUOS URBANOS COMO
ALTERNATIVA ENERGÉTICA PARA O ENCERRAMENTO DOS LIXÕES
DA PARAÍBA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora

Prof. Dr. Silvia Layara Floriani Andersen

JOÃO PESSOA - PB

2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M528c Melo, Sahyonara Estrela de Lacerda Hussein.

Conversão térmica dos resíduos urbanos como alternativa energética para o encerramento dos lixões da Paraíba / Sahyonara Estrela de Lacerda Hussein Melo. - João Pessoa, 2021.
66 f. : il.

Orientação: Silvia Layara Floriani Andersen.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Resíduos sólidos. 2. Resíduos urbanos. 3. Lixões. 4. Pirólise. I. Andersen, Silvia Layara Floriani. II. Título.

UFPB/BC

CDU 628.4(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA n° 86 da Sessão de Defesa Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba.

Ao décimo sexto dia do mês de dezembro de dois mil e vinte e um foi instalada a Banca de Defesa de Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas em Home Office, as 14h30, via Google Meet (meet.google.com/vjc-scmi-ycz) a que se submeteu a defesa pública de SAHYONARA ESTRELA DE LACERDA HUSSEIN MELO, matrícula 20201011258, com o título "**CONVERSÃO TÉRMICA DOS RESÍDUOS URBANOS COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA PARA O ENCERRAMENTO DOS LIXÕES DA PARAÍBA**". A Comissão Examinadora esteve constituída pelos professores: SILVIA LAYARA FLORIANI ANDERSEN (UFPB), JOELDA DANTAS (UFPB) e RIUZUANI MICHELLE BEZERRA PEDROSA LOPES (UFPB). Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, o(a) candidato(a) foi **.APROVADA..** pela Comissão Examinadora. E, para constar, foi lavrada a presente ata, assinada pelos membros da Comissão.

Observações: _Observar e levar em consideração a todos comentários e correções sugeridas pela banca examinadora. _____

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dra. SILVIA LAYARA FLORIANI ANDERSEN
Orientador(a)

Prof. Dra. JOELDA DANTAS - UFPB
Examinador(a) Interno(a)

Prof. Dra. RIUZUANI MICHELLE BEZERRA PEDROSA LOPES - UFPB
Examinador(a) Externo(a)

PPGER/CEAR/UFPB - Campus I, Caixa Postal 5115, CEP: 58051-900, João Pessoa - PB, Brasil.

Obs.(1): O discente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 45 dias a contar da data da defesa, os exemplares definitivos da dissertação.

Obs.(2): O docente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 20 dias a contar da data da defesa, o relatório de orientação para avaliação do colegiado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois quando eu me sentia cansada e incapaz Ele me mostrava que eu era mais que vencedora e que iria conseguir.

Ao meu esposo por sempre está ao meu lado me dando força, palavras de incentivo, aguentando meus momentos de estresse e sendo uma fortaleza.

Ao meu filho, tão compreensivo quando mamãe dizia que naquele momento eu não podia passear com ele ou assistir um filme porque eu tinha que entregar meu trabalho.

A minha mãe e irmã que sempre estão sempre ao meu lado no que eu precisar, sem medir esforços e sempre apostando que eu sou capaz.

A minha família que quando eu perdi a minha dissertação no meio da caminhada, por problemas técnicos do computador, todos estiveram ao meu lado me presenteando com um novo computador e me dando apoio para eu recomeçar e não desistir.

A minha grande amiga Junyelle que em todos os momentos liberou palavras de afirmação que eu iria conseguir vencer.

Aos meus colegas de mestrado, Delosmar, Fabiana, Isabel e Dalila que sempre estiveram disponíveis para tirar minhas dúvidas ou me ajudar com as análises.

Ao técnico Jhonatas Wagner, do Laboratório de Materiais e Química Ambiental (LabMaQ/UFPB) por todo auxílio e apoio na realização das análises termogravimétricas (TG) e nas caracterizações físico-químicas das amostras.

A professora Sibebe Berenice Castellã Pergher pelo apoio nas análises de FRX.

A técnica Patrícia Alves do Laboratório de Peneiras Moleculares (LABPEMOL/UFRN), pelo suporte nas análises de fluorescência de raios X (FRX).

A FAPESQ pelo incentivo financeiro, no qual me permitiu a dedicar exclusivamente ao mestrado.

À minha orientadora Dr^a Silvia Layara Floriani Andersen, quero de uma forma imensa expressar o meu muito obrigada, por sempre acreditar que eu iria conseguir, obrigada por toda a orientação, paciência, dedicação e auxílio nessa caminhada.

“E eu mesmo serei para ela um muro de fogo ao seu redor,
declara o Senhor, e dentro dela serei a sua glória”.

Zacarias 2:5

RESUMO

Atualmente o Brasil vem passando por um grande desafio, o encerramento dos lixões a céu aberto e sua destinação ambientalmente adequada. No ano de 2020 foram gerados 79 milhões de toneladas de resíduos, sendo que 29,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) acabaram indo para lixões ou aterros controlados, que não contam com um conjunto de sistemas e medidas necessários para proteger o meio ambiente e a saúde das pessoas contra danos e degradações. Nessa circunstância, torna-se urgente a busca por alternativas para a minimização de resíduos sólidos urbanos no mundo. Os municípios do estado da Paraíba vêm enfrentando dificuldades para o encerramento das atividades nos lixões, tendo em vista ao grande volume de resíduos depositado e poucos recursos financeiros para investir na destinação ambientalmente correta. Muitos desses lixões estão localizados próximos a locais de consumo humano, como plantações e recursos hídricos. No estado da Paraíba no ano de 2018 para 2021 houve um crescimento de mais de 550% dos municípios que encerram os lixões, sendo 156 municípios de 223 destinando de maneira adequada. Diversos estudos são realizados para aperfeiçoar a gestão dos resíduos sólidos e novas formas de tratamento tendo o reaproveitamento energético intrínseco à minimização da poluição, a valorização desses resíduos pode ser advinda de um processo pirólise, o qual tem como produtos compostos na forma de gás, líquido e/ou sólido, e que podem ser utilizados como fonte energética. A metodologia utilizada no estudo se deu através da caracterização físico-química obtida através das análises imediata, análise do poder calorífico, fluorescência de Raios X (FRX) e análise termogravimétrica. O RSU ficou com percentual de 10% de umidade tendo influência pela maneira a qual o material foi encontrado, já o RO (resíduos orgânicos) ficou com 71,11%. O resultado das análises imediata mostraram que há uma grande quantidade de compostos que podem ser devolatilizados, além de que, os valores obtidos do poder calorífico do RO foi de 20,13 MJ/kg e o RSU em 17,82 MJ/kg, sendo comparáveis aos dos combustíveis tradicionais de biomassa que já foram utilizadas para fins energéticos. Através das análises termogravimétricas notou-se que em 150 °C ocorre a perda de umidade, no qual corresponde ao processo de secagem e por volta dos 214 °C iniciou-se a decomposição térmica. A partir dos resultados das características físico-químicas, é possível analisar a viabilidade dos RSU no processo de pirólise. Tendo os resíduos sólidos urbanos viáveis para o processo de pirólise, já os resíduos orgânicos autores sugerem a conversão microbiológica. A pirólise dos resíduos urbanos é uma alternativa para diminuir a dependência de fontes de energia estrangeiras e um incentivo para mover o consumo mundial de combustíveis fósseis para energias renováveis. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de aplicação do processo de pirólise no tratamento dos resíduos sólidos urbanos, visando a geração de energia renovável.

Palavras-Chave: Resíduos sólidos urbanos, lixões, pirólise, energia renovável, Paraíba.

ABSTRACT

Currently, Brazil has been going through a great challenge, the closure of open-air dumps and their environmentally appropriate destination. In 2020, 79 million tons of waste were generated, with 29.5 million tons of urban solid waste (MSW) ending up in landfills or controlled landfills, which do not have a set of systems and measures necessary to protect the environment and people's health from damage and degradation. In this circumstance, it becomes urgent to search for alternatives to minimize urban solid waste in the world. Municipalities in the state of Paraíba have been facing difficulties in closing activities in dumps, given the large volume of waste deposited and few financial resources to invest in environmentally correct disposal. Many of these dumps are located close to places of human consumption, such as plantations and water resources. In the state of Paraíba, in the year 2018 to 2021, there was a growth of more than 550% of the municipalities that close the dumps, with 156 municipalities out of 223 properly destined. Several studies are carried out to improve the management of solid waste and new forms of treatment, having the energy reuse intrinsic to the minimization of pollution, the recovery of these wastes can come from a pyrolysis process, which has as products composed in the form of gas, liquid and/or solid, and which can be used as an energy source. The methodology used in the study was through the physical-chemical characterization obtained through immediate analysis, analysis of calorific value, X-Ray fluorescence (FRX) and thermogravimetric analysis. The MSW had a percentage of 10% of humidity, having influence by the way in which the material was found, whereas the RO (organic residues) had 71.11%. The result of the immediate analyzes showed that there is a large amount of compounds that can be devolatilized, in addition to that, the values obtained for the calorific value of RO were 20.13 MJ/kg and MSW in 17.82 MJ/kg, being comparable to traditional biomass fuels that have already been used for energy purposes. Through thermogravimetric analysis, it was noted that at 150 °C, moisture loss occurs, which corresponds to the drying process and at around 214 °C, thermal decomposition begins. From the results of the physicochemical characteristics, it is possible to analyze the viability of MSW in the pyrolysis process. Considering that urban solid waste is viable for the pyrolysis process, the authors suggest the microbiological conversion of organic waste. The pyrolysis of municipal waste is an alternative to reduce dependence on foreign energy sources and an incentive to move world consumption from fossil fuels to renewable energies. The objective of this work was to evaluate the potential of application of the pyrolysis process in the treatment of urban solid waste, aiming at the generation of renewable energy.

Keywords: Urban solid waste, dumps, pyrolysis, renewable energy, Paraíba

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma da Classificação dos Resíduos Sólidos.	19
Figura 2: Resíduos depositados no lixão sem adequada triagem.	20
Figura 3: Geração total de RSU por região (t/ano)	22
Figura 4: Gravimetria dos RSU no Brasil	23
Figura 5: Lixão próximo a plantação de Bananeira.	25
Figura 6: Heterogeneidade dos componentes sólidos a presença de aves de rapinas (urubus).	26
Figura 7: Fluxograma demonstrando as rotas dos processos de conversão da biomassa.	29
Figura 8: Área de coleta dos RSU.	40
Figura 9: Resíduos após o moinho de facas com peneira de 5mm.	41
Figura 10: Mapa comparativo de 2018 e 2021 da destinação do lixo na Paraíba.	45
Figura 11: Curva de TG e DTG do RSU com ar sintético	53
Figura 12: Curva de TG e DTG do RSU com nitrogênio	54
Figura 13: Curva de TG e DTG do RO com ar sintético	56
Figura 14: Curva de TG e DTG do RO com nitrogênio	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análise imediata do RSU.	46
Tabela 2: Análise imediata por Zhou	47
Tabela 3: Análise imediata do RO.	48
Tabela 4: Teores mencionados por Maccarini	48
Tabela 5: Poder Calorífico do RSU e RO em comparação com a literatura.	49
Tabela 6: Composição química elementar dos compostos inorgânicos presente no RSU e no RO via FRX, em base seca.	51
Tabela 7: Perda de massa da amostra de RSU	55
Tabela 8: Perda de massa da amostra de RO	57

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ASTM - American Society for Testing and Materials

CEAR - Centro de Energias Alternativas e Renováveis

CF - Carbono fixo

CNM - Confederação Nacional de Municípios

DTG - Termogravimetria derivada

FRX - Fluorescência de raios X

LABMAQ - Laboratório de Materiais e Química Ambiental

m0 - Massa da amostra antes do experimento

mc - Massa de cinzas

MMA - Ministério do Meio Ambiente

MPPB - Ministério Público da Paraíba

mr - Massa residual após o experimento

MV - Material volátil

NBR - Norma brasileira

PCI - Poder calorífico inferior

PCS - Poder calorífico superior

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RO – Resíduo orgânico

RSU - Resíduos sólidos urbanos

TAC - Termo de Ajuste de Conduta

T – Temperatura

t - Tempo

Tcinzas - Teor de cinzas

TG - Análise termogravimétrica

TMv - Teor de materiais voláteis

TOE - Toneladas de óleo equivalente

U - Umidade

UFPB - Universidade Federal da Paraíba

Z – Cinzas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 Relação Socioambiental dos Resíduos Sólidos	16
<i>3.1.1 Classificação dos Resíduos Sólidos</i>	<i>18</i>
3.2 Diagnóstico dos RSU no Brasil	20
<i>3.2.1 Cenário Atual dos RSU na Paraíba</i>	<i>24</i>
3.3 Biomassa como Fonte de Energia Renovável	27
3.4 Conversão Térmica dos RSU	29
<i>3.4.1 Combustão</i>	<i>31</i>
<i>3.4.2 Gaseificação</i>	<i>31</i>
<i>3.4.3 Pirólise</i>	<i>32</i>
3.5 Procedimentos de Caracterização da Biomassa	34
<i>3.5.1 Análise Imediata</i>	<i>35</i>
<i>3.5.2 Análise de Poder Calorífico</i>	<i>36</i>
<i>3.5.3 Análise de Fluorescência de Raio X (FRX)</i>	<i>36</i>
<i>3.5.4 Análise Termogravimétrica (TGA)</i>	<i>37</i>
4 MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1 Preparo da Matéria Prima	39
4.2 Análise Imediata	41
4.3 Análise do Poder Calorífico	42
4.4 Análise de Fluorescência de Raios X (FRX)	43
4.5 Análise Termogravimétrica (TGA) e Análise de Comportamento Térmico	43
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1 Panorama da situação dos RSU no Estado da Paraíba	44
5.2 Análise Imediata dos Resíduos Sólidos Urbanos e dos Resíduos Orgânicos	45

5.3 Poder Calorífico dos RSU e do RO	49
5.4 Composição Elementar das Cinzas por FRX	50
5.5 Análise Termogravimétrica	52
6 CONCLUSÕES	59
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
8 REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas têm sido crescente os estudos voltados para a produção de energia limpa e sustentável, as energias renováveis representam 13% do consumo mundial de energia. Combustíveis fósseis 80% e energia nuclear 7%, o carvão, petróleo e gás foram a base energética do desenvolvimento tecnológico do século XX, mas criaram problemas, os quais estão potencialmente presentes hoje (exaustão das reservas, problemas geopolíticos e poluição). As energias renováveis quando bem administradas não criam os problemas citados anteriormente e estão crescendo rapidamente de forma sustentável (WU *et al.*, 2020; KAMRAN, FAZAL e MUDASSAR, 2020; GOLDEMBERG e PALETTA, 2012).

A utilização de biomassa como fonte de energia renovável é muito vantajosa devido à grande disponibilidade de matérias primas que podem ser utilizadas, à facilidade de obtenção desses materiais, ao baixo custo e à possibilidade de utilizar matérias não aproveitadas (resíduos). Uma das grandes vantagens da utilização de biomassa é seu potencial de gerar, além de energia e combustível, produtos químicos de interesse industrial (fenóis, álcoois, aldeídos, cetonas, aromáticos, entre outros) (TORRI, 2013).

O Ministério do Meio Ambiente (MMA), em 2 de agosto de 2010 sancionou a Lei N° 12.305 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), visando o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos. Os objetivos principais da PNRS pretendem proteger a saúde pública junto com a qualidade ambiental, mantendo sempre em foco a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, além da disposição ambiental correta dos rejeitos.

A principal forma brasileira de destinação final dos resíduos sólidos são os aterros sanitários, porém muitos municípios do Brasil ainda destinam seus resíduos inadequadamente, no qual consistem em ser lançado a céu aberto, ou seja; lixões, sendo trivialmente descarregados sobre o solo, com a ausência de medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Em vista disso, torna-se provável a proliferação de vetores, geração de maus odores, poluição das águas superficiais e subterrâneas, além da falta de controle da composição dos resíduos descarregados (SOUZA, 2020; FERREIRA *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2020).

Atualmente o Brasil vem passando por um grande desafio, o encerramento dos lixões a céu

aberto e sua destinação ambientalmente adequada. A gestão de resíduos sólidos tem se tornando um assunto cada vez mais complexo ao redor do mundo ao longo da última década.

Em 2020, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) lançou um panorama dos resíduos sólidos no Brasil, onde contou com a retrospectiva dos 10 anos desde que foi instituído a PNRS de acordo com a Lei 12.305/2010, com a visão evolutiva e abrangente tendo como finalidade verificar o alcance das ações empreendidas e a velocidade com que o setor tem se desenvolvido na última década. Entre 2010 e 2019, a geração dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil registrou considerável incremento, passando de 67 milhões para 79 milhões de toneladas por ano (ABRELPE, 2020).

De acordo com o Confederação Nacional de Municípios (CNM) (2021), no qual criou-se o observatório dos lixões com o intuito de disseminar informações sobre a gestão dos resíduos sólidos municipais, trazendo o mapa da Paraíba que visam o desenvolvimento dos municípios quanto ao encerramento dos lixões, aos que ainda mantém lixões ativos, os que estão em andamento e os que já destinaram para aterro sanitário.

Nessa circunstância, torna-se urgente a busca de alternativas para a minimização de lixo urbano no mundo. Diversos estudos são realizados para aperfeiçoar a gestão dos resíduos sólidos e novas formas de tratamento, tendo o reaproveitamento energético intrínseco à minimização da poluição. A pirólise dos resíduos urbanos é uma alternativa para diminuir a dependência de fontes de energia e um incentivo para migrar o consumo mundial de combustíveis fósseis para energias renováveis (LEME *et al.*, 2017).

O processo de conversão por pirólise enquadra-se como um procedimento para gerar fonte de energias renováveis, oportunizando a análise da viabilidade financeira para os municípios e sua eficiência energética, conseqüentemente, dando uma destinação ambientalmente adequada e recuperando a área que ficou degradada devido a utilização do lixão. Uma das vantagens da conversão térmica é o uso direto da energia térmica em geração de vapor ou energia elétrica, através de uma alimentação contínua de resíduos em um processo relativamente sem ruídos e sem odores, utilizando se pequena área para instalação (SILVA *et al.*, 2018).

Diante dos aspectos demonstrados, este trabalho tem por finalidade estudar o comportamento da conversão térmica pelo processo de pirólise dos resíduos sólidos, advindo de lixões e sua possível aplicação na geração de energia renovável.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar o potencial de aplicação do processo de pirólise no tratamento dos resíduos sólidos urbanos, oriundos de lixões a céu aberto de um município no estado da Paraíba, para o aproveitamento energético.

2.2 Objetivos específicos

- Traçar um panorama da situação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) do estado da Paraíba;
- Caracterizar as propriedades físico-químicas dos resíduos oriundos do lixão através da análise imediata, poder calorífico, termogravimetria (TG), fluorescência de Raios-X (FRX) das cinzas;
- Estimar o potencial de aproveitamento energético dos RSU, com base na análise de caracterização físico-química, viabilidade ambiental, técnica e operacional;
- Conduzir experimentos da pirólise com amostragens de RSU oriundo de um município da Paraíba, para avaliação da possibilidade de aplicação energética.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Relação Socioambiental dos Resíduos Sólidos

No início dos tempos, os homens moravam em cavernas, sobreviviam da caça e pesca, vestiam-se de peles e formavam uma população minoritária sobre a terra. Quando a comida começava a ficar escassa, eles se mudavam para outra região e os seus lixos, deixados sobre o meio ambiente, eram logo decompostos pela ação do tempo. À medida que foi civilizando-se o homem passou a produzir peças para promover seu conforto, construção de moradias, criação de animais, cultivo de alimentos fixando-se de forma permanente em um local. Conseqüentemente a produção de lixo foi aumentando, mas ainda não havia se constituído em um problema para o poder público (BARCIOTTE, 1994).

O ser humano, durante a sua trajetória histórica, estabeleceu a ocupação e o uso espacial da terra, utilizando os recursos naturais basicamente interessado na sua própria sobrevivência. Com as constantes transformações sociais e o processo acelerado de urbanização o indivíduo tem provocado sérios problemas à natureza devido às suas necessidades de estabelecer moradia (LIMA; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2014).

Na Idade Média, a maioria dos restos resultantes da atividade do homem estava diretamente relacionada aos resíduos produzidos pelo seu corpo fezes, urina, secreções (no qual eram lançados pelas janelas), em geral e o próprio corpo humano em decomposição. Também havia os restos provenientes da alimentação, carcaças de animais, cascas de frutas e hortaliças. Os resíduos começaram a causar medo no homem, a partir do momento do surto manifestado pelas epidemias e pandemias de algumas doenças na Idade Média, mais precisamente pela peste negra no continente europeu durante o século XIV (VELLOSO, 2008).

A problemática da geração e descarte do lixo teve um grande impulso, após as epidemias tornou-se alvo de preocupação das autoridades, tomando a iniciativa de introduzir a coleta dos resíduos, sua destinação final ainda era considerada insalubre. Porém esse fato não causou nenhuma preocupação maior, naquela época o que estava em alta era o desenvolvimento e não suas conseqüências (MIZIARA, 2008).

De acordo com Velloso (2008) foi no final da Idade Média e na Modernidade, as pessoas que cuidavam da destinação final do lixo eram vistas como marginais à sociedade.

O lixo só ganha valorização no período industrial no qual houve um aumento na população em consequência do avanço na tecnologia possibilitou um salto na produção em série de bens de consumo, o que antes predominava matéria orgânica passou-se a encontrar outros tipos de matérias, como plásticos, isopores, pilhas, baterias de celular e lâmpadas. Esse desenvolvimento foi se acentuando quando descobrem que o lixo pode gerar dinheiro, devido à possibilidade de transformar em matéria prima (BARCIOTTE, 1994).

A partir da década de 1970 os resíduos começaram a ser considerados como questão ambiental e os riscos de uma destinação inadequada, percebeu-se quanto o nosso planeta estava sendo degradado por substâncias de origem biológica, química e radioativa, que vinham deteriorando a saúde do homem e do seu ambiente (VELLOSO, 2008).

A partir da segunda metade do século XX com o desenvolvimento econômico, o crescimento populacional e a urbanização, ocorreu um aumento na produção de resíduos sólidos, tanto em quantidade como em diversidade, que passaram a abrigar em sua composição elementos sintéticos e perigosos aos ecossistemas e à saúde humana, em virtude das novas tecnologias incorporadas ao cotidiano. Com toda essa evolução despertou na população mundial a preocupação com a geração e destinação final do lixo (GOUVEIA, 2012).

Problemas ambientais decorrentes da gestão inadequada agravando os impactos negativos sobre as condições de saúde e a qualidade de vida da população, constitui uma importante fonte de exposição humana a várias substâncias tóxicas. Os habitantes de bairros periféricos, que é para onde a maior parte dos resíduos continua a ser encaminhada enfrentam problemas decorrentes a exposição nas proximidades do lixão (LIMA; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2014).

De acordo com o autor Gouveia (2012) o manejo adequado dos resíduos é uma importante estratégia de preservação do meio ambiente, assim como a proteção da saúde. A decomposição dos resíduos resulta na formação de um líquido de cor escura, o chorume, que pode contaminar o solo e as águas superficiais ou chegar até o lençol freático. Estes locais tornam-se ambientes propícios para a proliferação de vetores e de outros agentes transmissores de doenças. De modo geral, os impactos dessa degradação estendem-se para além das áreas de disposição final dos resíduos, afetando toda a população.

No entanto, é necessário, que haja sistemas que possibilitem a destinação adequada para os resíduos, bem como a sua recuperação energética. Diante dessa problemática dos procedimentos de deposição em aterros e lixões existe uma busca por tecnologias capazes de minimizar os impactos ambientais causados por esta atividade, de modo que venha atender as exigências legais e visando o desenvolvimento sustentável (MAKARICHI; JUTIDAMRONGPHN; TECHATO, 2018).

Diante deste contexto, deu-se a busca por fontes menos prejudiciais ao meio ambiente, e uma das opções foram às fontes de energias renováveis. As fontes de energias renováveis, provocam um menor impacto ambiental quando comparados a outras fontes energéticas, possuem um ciclo relativamente curto de produção, como a luz solar, os ventos (eólica), a água (hídrica), as marés (maremotriz), o calor da terra (geotérmica) e a biomassa como combustível, ao contrário das fontes não-renováveis, que levam milhões de anos para se formar (KARKANIA; FANARA; ZABANIOTOU, 2012).

Sendo assim, percebe-se que o uso da biomassa proveniente de RSU tem grande importância no quesito ambiental, pois proporciona um destino ecologicamente correto a estes resíduos, que são produzidos em enormes quantidades e descartados de forma inadequada. E a geração de eletricidade por meio da mesma é uma fonte abundante e de baixo custo (SHEN *et al.*, 2015).

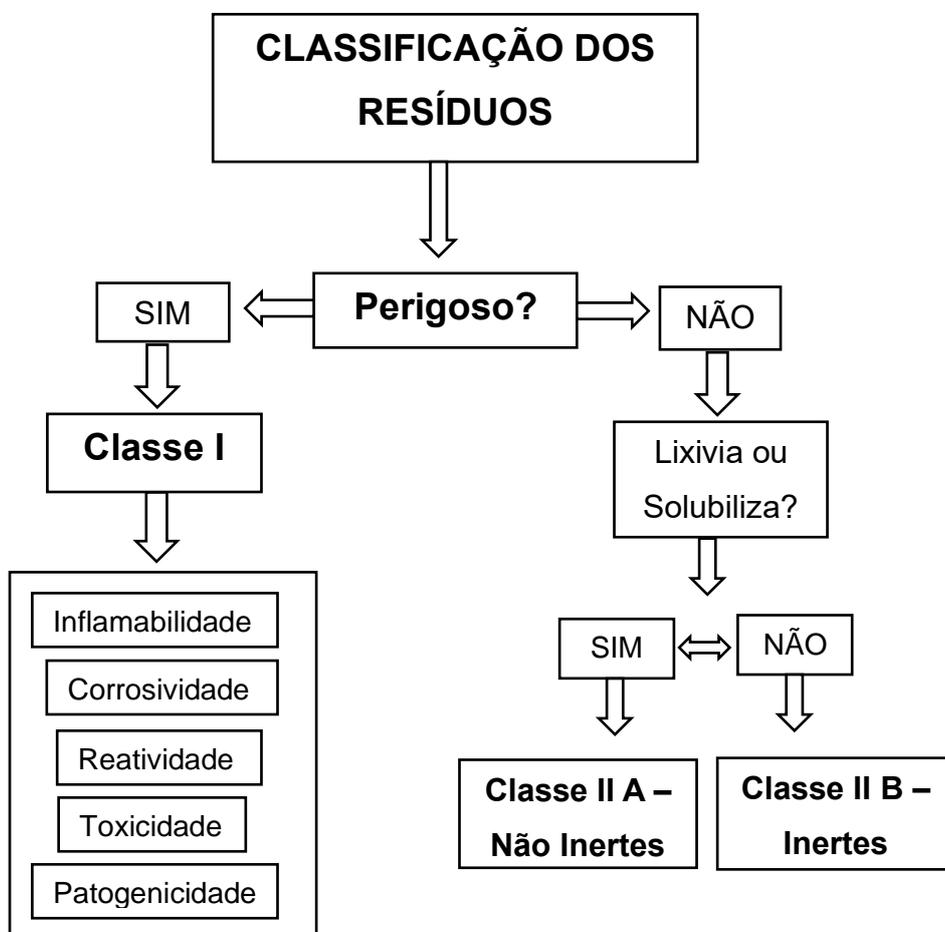
Dessa maneira, para o uso dos resíduos sólidos em energia e a busca pelo desenvolvimento sustentável, há dois processos para conversão da biomassa, são eles: a) processos biológicos que consistem na digestão anaeróbica e a fermentação; e b) processos termoquímicos que versam na combustão, pirólise, gaseificação e liquefação (SOMORIN; ADESOLA; KOLAWOLE, 2017).

3.1.1 Classificação dos resíduos sólidos

De acordo com a NBR 10.004:2004 que normatiza sobre a Classificação dos Resíduos Sólidos, na qual, se baseiam em determinadas características ou propriedades identificadas e ela é relevante para a escolha da estratégia de gerenciamento mais viável. Classificando os resíduos sólidos quanto a sua periculosidade, ou seja, característica apresentada pelo resíduo em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, que podem representar potencial risco à saúde pública e ao meio ambiente. A Figura 1 demonstra a classificação dos tipos de resíduos existentes, de acordo com

sua periculosidade.

Figura 1. Fluxograma da Classificação dos Resíduos Sólidos.



Fonte: Adaptado da NBR 10.004:2004 (2021).

A adequada triagem por meio da classificação dos resíduos ou segregação visa garantir a possibilidade de reutilização, reciclagem e segurança no manuseio, tendo em vista que diversos são os resíduos gerados e destinados aos lixões sem segregação, como apresentado na Figura 2.

Figura 2. Resíduos depositados no lixão sem adequada triagem.



Fonte: Autora (2019).

3.2 Diagnóstico dos RSU no Brasil

A crescente produção de resíduos sólidos no mundo tem ocasionado impactos de ordem ambiental, social, econômica e de saúde pública, devido ao crescimento populacional, a geração desenfreada, o descarte e a disposição final inadequada desses resíduos (ISWA, 2017).

Com a visão evolutiva e abrangente tendo como finalidade verificar o alcance das ações empreendidas e a velocidade com que o setor tem se desenvolvido, é necessário, que haja sistemas que possibilitem a destinação adequada para os resíduos, bem como a sua recuperação energética. Diante dessa problemática dos procedimentos de deposição em aterros e lixões, existe, portanto, a demanda por tecnologias capazes de minimizar impactos ambientais através de técnicas mais eficientes, de modo a atender a exigências normativas ambientais, além da busca pelo desenvolvimento sustentável (MAKARICHI; JUTIDAMRONGPHN; TECHATO, 2018).

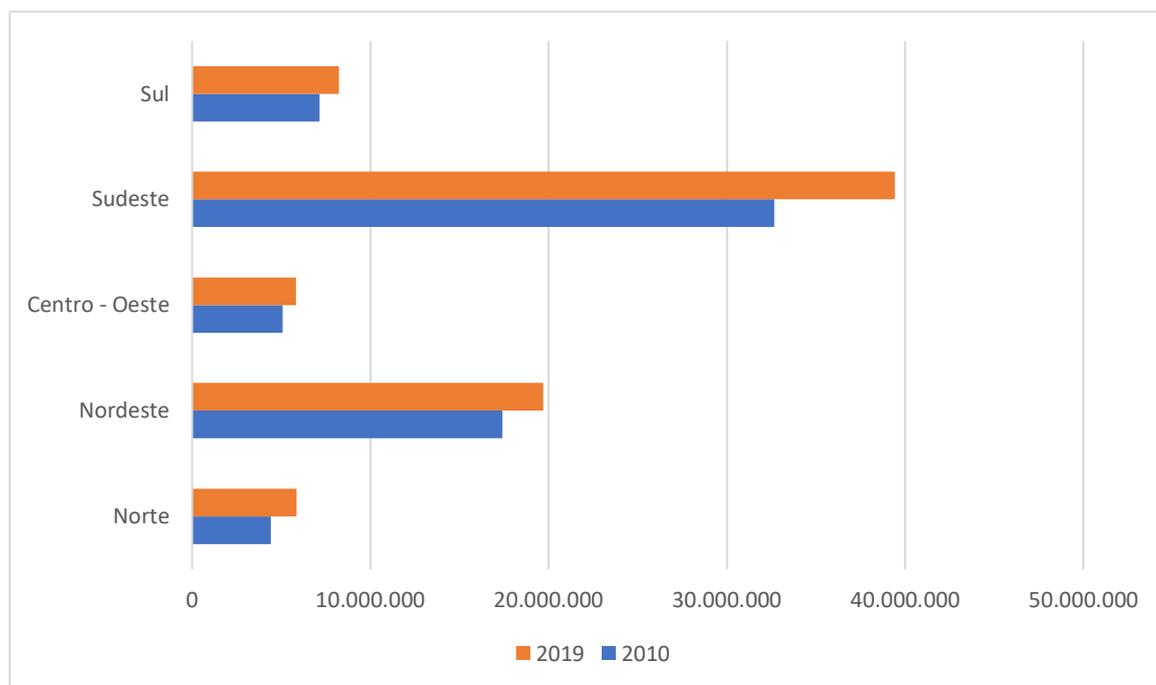
Com o intuito da melhoria da situação e amenização destes problemas PNRS Lei n° 12.305/2010 pretendem proteger a saúde pública junto com a qualidade ambiental, mantendo sempre em foco a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, além da disposição final ambiental adequada dos rejeitos de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e a minimizar os impactos adversos.

Com o passar dos anos da promulgação o Brasil apresenta dificuldade na implementação da lei, o prazo para a efetiva implantação da disposição final ambientalmente adequada encerrou-se em agosto de 2014, porém muitos são os municípios que não se enquadram (ZAGO; BARROS, 2019).

De acordo com a Abrelpe (2021) no Brasil, a maior parte dos RSU coletados segue para disposição em aterros sanitários, tendo registrado um aumento de 10 milhões de toneladas em uma década, passando de 33 milhões de toneladas por ano para 43 milhões de toneladas. Por outro lado, a quantidade de resíduos que segue para unidades inadequadas (lixões e aterros controlados) também cresceu, passando de 25 milhões de toneladas por ano para pouco mais 29 milhões de toneladas por ano. A Figura 3 traz valores da geração de resíduos em toneladas/ ano gerada por região do Brasil, num espaço de quase 10 anos após a implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Percebe-se que na Figura 3 em 2010 a geração de resíduos no Norte, Centro – Oeste e Sul não chegaram a 10 mil toneladas/ano, já Nordeste e Sudeste superaram esses valores. Em um espaço de 9 anos de geração de resíduos sólidos houve um aumento anual em todas as regiões, porém o Norte, Centro – Oeste e Sul permaneceram abaixo de 10 mil toneladas, já o Nordeste e o Sudeste houve um aumento entre 3 à 7 mil/t nesse espaço de tempo.

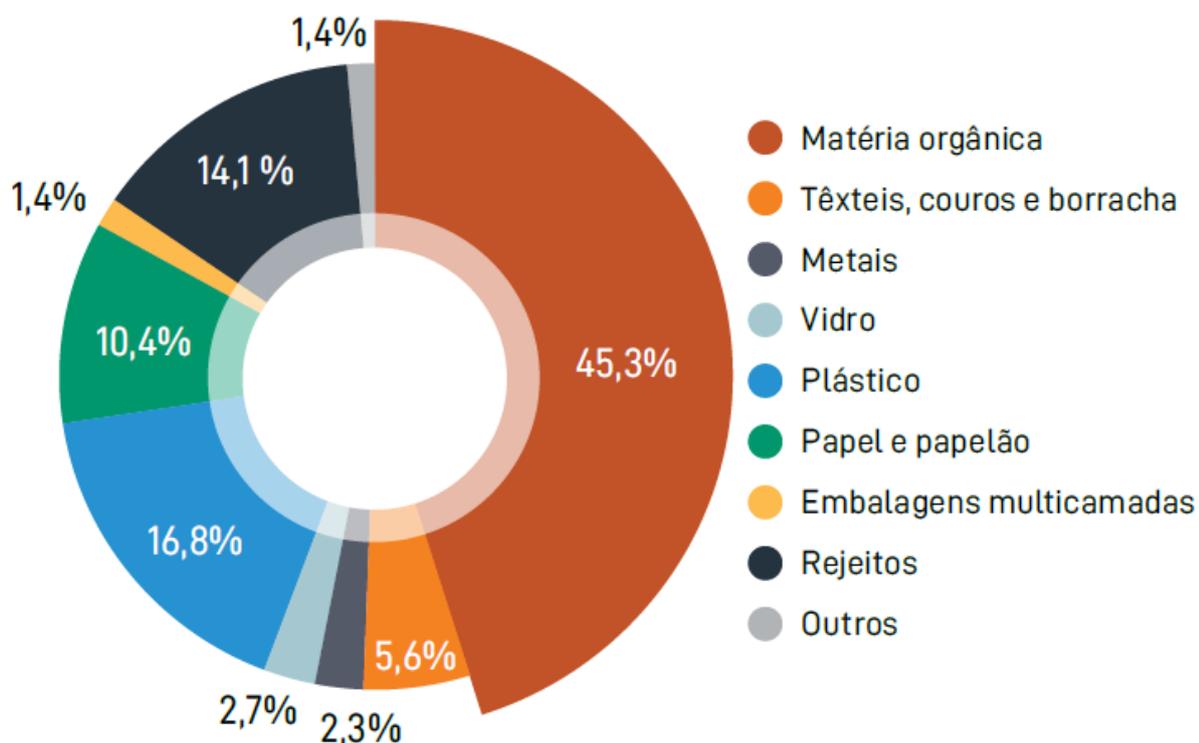
Figura 3. Geração total de RSU por região (t/ano)



Fonte: Adaptado da Abrelpe (2021)

A Figura 4 traz a composição gravimétrica que diz respeito ao percentual de cada componente em relação ao peso total dos resíduos, e sua identificação é fundamental para a implantação das soluções com vistas a uma gestão adequada dos resíduos sólidos. Apesar de uma maior participação da fração orgânica no total de RSU coletados no país, são descartados de forma misturada, inviabilizando ações de extrema importância para o reaproveitamento (BRASIL, 2020).

Figura 4. Gravimetria dos RSU no Brasil



Fonte: Abrelpe (2021)

A visão contemporânea da gestão dos resíduos orgânicos tem apontado a economia circular, esse novo paradigma direciona a uma mudança no próprio conceito de resíduos, que passam a ser considerados como recursos, uma vez que, em grande parte, podem ser reaproveitados, reduzindo a pressão sobre os recursos naturais. Esse enorme potencial já é reconhecido por diversos países, cuja gestão de resíduos orgânicos está intrinsecamente ligada a economia local, fomentando renda, emprego e mitigação dos impactos ambientais (LEITAO, 2015).

Os municípios lamentavelmente vêm buscando a extensão dos prazos para adequação à disposição final dos rejeitos, tendo em vista que aproximadamente 60% dos municípios ainda não conseguiram atender a esse dispositivo legal. Alega-se ausência capacidade institucional dos titulares, o não reconhecimento da importância da gestão adequada de resíduos, a ausência de instrumentos econômicos e tributários para impulsionar as melhores práticas, e o financiamento dos serviços (ZAGO; BARROS, 2019).

O novo marco legal do saneamento básico estabeleceu em sua Lei nº14.026/2020 alterações na Lei 12.305/2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos passando a entrar em vigor as seguintes alterações no Art. 54º:

I – até 2 de agosto de 2021, para capitais de Estados e Municípios integrantes de Região Metropolitana (RM) ou de Região Integrada de Desenvolvimento (Ride) de capitais; II – até 2 de agosto de 2022, para Municípios com população superior a 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010, bem como para Municípios cuja mancha urbana da sede municipal esteja situada a menos de 20 (vinte) quilômetros da fronteira com países limítrofes; III – até 2 de agosto de 2023, para Municípios com população entre 50.000 (cinquenta mil) e 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010; e IV – até 2 de agosto de 2024, para Municípios com população inferior a 50.000 (cinquenta mil) habitantes no Censo 2010 (BRASIL, 2020).

Adiar os prazos relacionados a adequação para disposição correta dos rejeitos nos municípios pode acarretar graves problemas para os cidadãos, uma vez que a produção de lixo é crescente e tem sua destinação final realizada, geralmente, de maneira imprópria.

3.2.1 Cenário Atual dos RSU na Paraíba

Os municípios da Paraíba vêm enfrentando dificuldades para o encerramento das atividades nos lixões, tendo em vista um grande volume de resíduos devido há anos sendo depositados e pouco recurso para investir na destinação ambientalmente correta. Muitos desses lixões estão localizados próximos a locais de consumo humano, como plantações e recursos hídricos, como demonstrado na Figura 5. Alguns gestores se recusam a assinar os acordos de não persecução penal (que, em resumo, previa o fechamento dos lixões da Paraíba em um prazo determinado, em troca da extinção de punibilidade pelo crime ambiental) (MPPB, 2020).

Figura 5. Lixão próximo a plantação de Bananeira.



Fonte: Autora (2019)

De acordo com o MPPB (2019), dos 223 municípios existentes 195 ainda mantêm lixões a céu aberto, ou seja, apenas 12,56% contam com aterros sanitários. O Ministério Público determinou o encerramento dos lixões para 2020, no qual foi assinado um TAC (Termo de ajuste de conduta) entre o Ministério Público e os municípios ressalta a problemática que vem sendo enfrentada pelos gestores no encerramento, tendo em vista que existe lixões com mais de 15 anos que despejam resíduos, de forma conseqüentemente haverá um alto custo para enviar todos esses resíduos para um aterro sanitário (MPPB, 2019).

De acordo com Mendes *et al.*, (2020), a maioria dos municípios paraibanos enviam os resíduos gerados diariamente em lixões a céu aberto, contando com 191 cidades, sem nenhuma proteção ao meio ambiente e a saúde pública. Além disso, os municípios que possuem aterros sanitários em funcionamento, onde deveriam receber somente os rejeitos, são destinados todo o lixo urbano, sem a devida separação segundo suas características (papel, plástico, metal, alumínio, vidro), e possível

reaproveitamento, o que sobrecarrega a operacionalização e com o passar do tempo ocorre a saturação do local, em razão da ausência de coleta seletiva do ente público e da sociedade civil.

Pode-se apontar que a forma de descarte dos resíduos sólidos nos lixões é uma disposição inadequada que contradiz as normas e que pode afetar o meio ambiente, portanto, análises específicas são necessárias para especificar a existência de contaminação e o grau de afetação. A heterogeneidade dos componentes sólidos a presença de aves de rapinas (urubus), papel, ferro, plásticos e garrafa PET (Polietileno tereftalato) e outros diversos produtos que são facilmente encontrados nos lixões como mostra na Figura 6 (FREIRE *et al.*, 2020).

Figura 6. Heterogeneidade dos componentes sólidos a presença de aves de rapinas (urubus).



Fonte: Autora (2019)

3.3 Biomassa como Fonte de Energia Renovável

A população humana está aumentando a uma taxa elevada e já cruzou cerca de 7,2 bilhões e deve aumentar entre 9,6 e 12,3 bilhões em 2100 o consumo de energia aumentará 1,2% ao ano e deve alcançar 18,9 bilhões de TOE (toneladas de óleo equivalente) em 2040. Os principais exportadores de petróleo (países do Oriente Médio), alegam que não será capaz de atender a demanda de energia nos próximos 50 anos, a superexploração de energia fóssil representa uma séria ameaça ao meio ambiente e à sociedade (BHATIA *et al.*, 2021).

A biomassa é o recurso renovável mais abundantemente disponível em terra e sua produção global estimada é de cerca de 2×10^{11} toneladas (base seca de carbono) em 2016, sendo explorada para a síntese de vários materiais (biochar e grafeno etc.) tendo aplicação na produção de energia. De preferência, os materiais usados para a produção de energia renovável em grande escala deve ser barata, produzida a partir de fontes abundantes e naturais, com o desenvolvimento de soluções eficientes e econômicas, é uma necessidade de pré-requisito de tempo (BHATIA *et al.*, 2021).

O uso da biomassa contribui para a minimização do impacto causado pelos gases de efeito estufa, define-se biomassa como todo material orgânico não-fóssil e biodegradável originado de plantas, animais e micro-organismos, podendo ser incluindo os resíduos florestais, agrícolas, industriais e domésticos. Além disto, gases e líquidos recuperados de processos de decomposição de materiais orgânicos não-fósseis e biodegradáveis também são consideradas biomassa (UNFCCC, 2005)

A biomassa vegetal apresenta como principal constituinte lignocelulose, que é constituída por três diferentes tipos de polímeros, sendo eles a celulose, hemicelulose e lignina, que estão presentes em diferentes concentrações em cada tipo de biomassa (PÉREZ *et al.*, 2002; ROWELL *et al.*, 2005).

A celulose é o principal componente encontrado na parede celular da biomassa vegetal. Este polímero apresenta alto peso molecular (ou mais) e é constituído por uma cadeia linear de moléculas unitárias de D-glucoparinose (glicose), no qual são unidas por ligações 1-4 em configuração β . A unidade de anidroglicose, formada pela remoção de água de cada D-glucoparinose, é polimerizado em longas cadeias de celulose, podendo conter entre 5000 e 10000 unidades de glicose, sendo esta estrutura conhecida como celobiose (MOHAN, PITTMAN e STEELE, 2006; GÓMEZ *et al.*, 2008).

A hemicelulose, segundo constituinte químico da biomassa vegetal, encontra-se como uma mistura de vários monossacarídeos não-celulósicos, tais como a glucose, manose, galactose, xilose, arabinose e são geralmente nomeadas de acordo com os polímeros que as compõe, e.g. galactoglucomanan, arabionoglucuronoxylan, arabinogalactan, etc (ROWELL *et al.*, 2005).

A hemicelulose exibe baixo peso molecular, se comprado com a celulose, e como consequência um baixo grau de polimerização. Este componente se encontra intimamente associada com a celulose, contribuindo para a composição estrutural da biomassa vegetal. Diferente da celulose, a hemicelulose apresenta solubilidade na presença de uma solução alcalina e hidrolisada em solução ácida (MOHAN, PITTMAN e STEELE, 2006; GÓMEZ *et al.*, 2008; BASU, 2013).

A lignina é uma macromolécula amorfa que é formada por ligações cruzadas e não possui uma estrutura exata, contendo diversas ramificações (MOHAN, PITTMAN e STEELE, 2006). Além disto, apresenta-se como uma substância tridimensional, constituída de uma estrutura polifenólica que tem como matriz uma variedade de ligações de fenilpropano. Dentre as ligações de fenilpropano, três unidades monoméricas geralmente encontradas são: o álcool cumarílico, álcool coniferílico e álcool sinapílico (ROWELL *et al.*, 2005; GÓMEZ *et al.*, 2008)

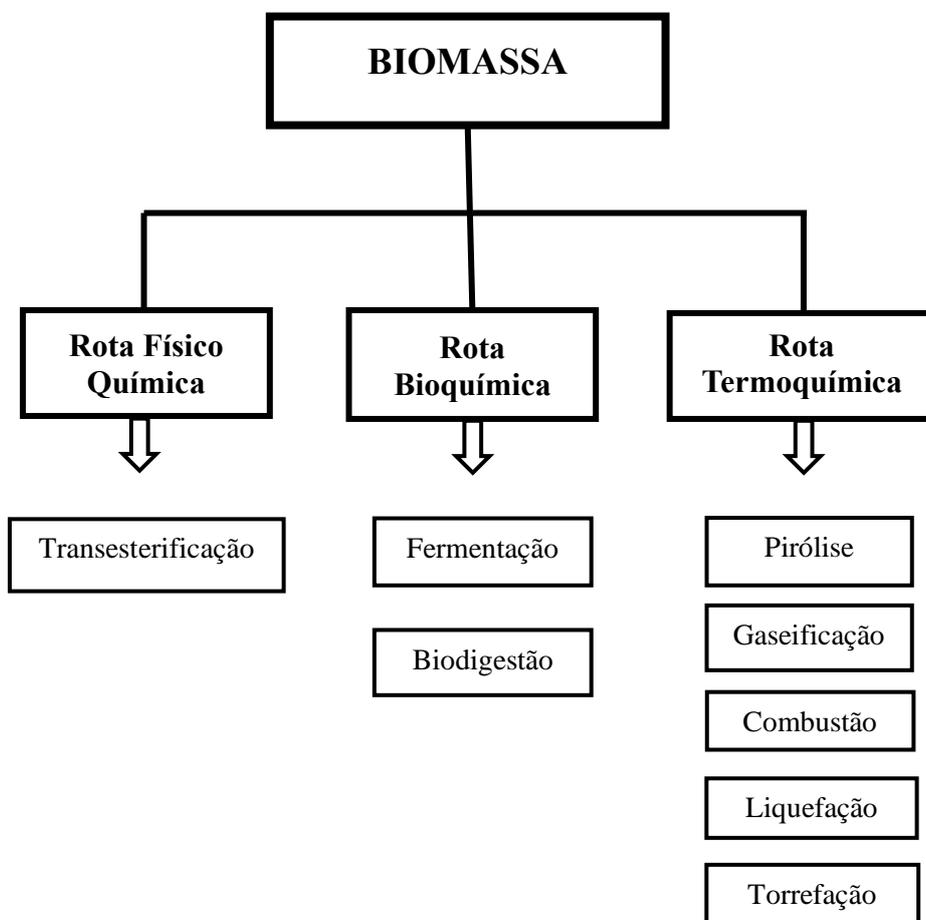
Apesar da celulose, hemicelulose e lignina estarem em maior quantidade na biomassa vegetal, ainda existem outros compostos presentes na mesma, entretanto em uma pequena fração, sendo elas os extratos orgânicos e os materiais inorgânicos. Os extratos orgânicos são compostos químicos presentes na biomassa vegetal que podem ser extraídos através de solventes. Esses compostos são encontrados na parede celular e geralmente constituído de gorduras, ácidos graxos, ceras, resinas, proteínas, e outros compostos orgânicos (ROWELL *et al.*, 2005; MOHAN, PITTMAN e STEELE, 2006).

A estrutura da biomassa tem uma grande influência na natureza e no rendimento do processo de transformação de si mesma em energia, algumas características são fundamentais para estabelecer o uso apropriado da biomassa, como a análise da composição química imediata, a química elementar, a composição granulométrica, o poder calorífico e a quantidade de cinzas. Os materiais inorgânicos se referem frequentemente as cinzas, produto sólido do tratamento térmico em altas temperaturas, que está contida na biomassa vegetal. O seu conteúdo na biomassa pode variar, podendo exibir altos teores ou até baixíssimo de cinzas, no qual pode apresentar grande variedade de elementos (ROWELL *et al.*, 2005).

3.4 Conversão Térmica dos RSU

A maior barreira encontrada na adoção dos combustíveis derivados da biomassa é a sua forma, o qual traz certa inconveniência, pois, ao contrário dos gases e líquidos, a biomassa não pode ser manipulada, armazenada ou transportada com facilidade (BASU, 2013). Entretanto, este fator negativo, torna-se uma motivação para utilização de processos de conversão, para se obter combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, de acordo com a escolha da biomassa e características finais. Os processos de conversão da biomassa são geralmente divididos em três grandes grupos ou rotas como mostra na Figura 7 (MCKENDRY, 2002b; BRIDGWATER, 2012).

Figura 7. Fluxograma demonstrando as rotas dos processos de conversão da biomassa.



Fonte: Adaptado de Basu (2013).

A rota físico-química representa o processo em que exigem uma etapa inicial de extração mecânica, ou seja, a compressão e o esmagamento do material, onde os óleos são extraídos através da prensagem de sementes de algodão, mamona, girassol etc., como ocorre na produção do biodiesel. Os processos provenientes da rota bioquímica são aqueles em que a biomassa sofre a conversão através do uso de reações química e/ou biológicas (bactérias e enzimas), enquanto a rota termoquímica refere-se aos processos de conversão em que a biomassa sofre um tratamento térmico, geralmente, em elevadas temperaturas (KUMAR *et al.*, 2015).

Quando a biomassa é tratada na forma de resíduos as rotas de conversão bioquímicas e termoquímicas apresentam maior destaque, por terem a velocidade de conversão e necessidade de energia externa, o que nas reações bioquímicas ocorrem muito lentamente. Por outro as reações termoquímicas necessitam de energia externa para obtenção dos produtos, diferentemente das reações bioquímicas que não necessitam de energia. O que irá influenciar na escolha do processo de conversão será o tipo de biomassa, forma de energia desejada, condições econômicas e fatores específicos do projeto (BASU, 2013).

Hoje, a demanda mundial por fontes renováveis de energia é o fator chave na revitalização da produção de energia. De acordo com a PNRS 12.305/2010 a presente lei já prevê em seus artigos a viabilidade do aproveitamento energético dos resíduos sólidos, dando uma destinação ambiental adequada aos resíduos.

A conversão termoquímica da biomassa é considerada um dos processos mais promissores para a utilização de biomassa. Esses processos são empregados para geração de energia, produção de líquidos biocombustíveis, produtos químicos e carvão vegetal. É importante um bom entendimento sobre a decomposição da biomassa durante a conversão termoquímica para um eficiente desenvolvimento da tecnologia de processamento (LOPEZ *et al.*, 2013).

A seleção de biomassa, para cada processo termoquímico, depende de suas principais propriedades físico-químicas (umidade conteúdo, matéria volátil, carbono fixo, teor de cinzas, valor calorífico, teor mineral etc.). Para processos de pirólise, as características desejáveis da biomassa são materiais voláteis de alta e baixo teor de cinzas. Para processos de combustão, a biomassa deve apresentar alto valor de aquecimento e baixo teor de cinzas. No caso de processos de gaseificação, a biomassa deve ter alto carbono fixo (PARASCANU *et al.*, 2019).

3.4.1 Combustão

Combustão pode ser definida como a conversão de combustíveis de biomassa a várias formas de energia útil na presença de ar ou oxigênio. É a queima de biomassa dentro de uma faixa de temperatura de 800 - 1000 ° C para produzir gases quentes e cinzas, armazenando calor e consequentemente produzindo energia elétrica (OSMAN *et al.*, 2017).

A combustão consiste em uma reação rápida entre combustível e oxigênio. O oxigênio do ar reage com o carbono e hidrogênio do combustível produzindo dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O). A reação entre o combustível e o ar só ocorre se houver condições favoráveis e isso significa temperatura, pressão e relação ar/combustível adequadas, transformando em várias formas de energia útil num processo de oxidação rápida (OLIVEIRA, 2015).

Esse processo envolve a junção das transferências de calor e massa, além de várias reações químicas, no qual, constitui um fenômeno difícil.

A combustão da biomassa inicia-se quando acontece a ignição do combustível. A fase posterior será secagem, processo que envolve a evaporação da água contida na biomassa, trabalhando em temperaturas de 100°C à 150°C. Conforme a biomassa perde umidade, a sua temperatura aumenta, seguindo-se a fase da pirólise entre 150°C à 230°C, onde são liberados os voláteis do combustível. Logo, a secagem e a pirólise provocam uma perda de massa do material, em seguida, começa a combustão do resíduo sólido, restando no final do processo a parte inorgânica e as cinzas (BORGES, 2020).

3.4.2 Gaseificação

O fenômeno da gaseificação pode ser descrito com precisão que o calor liberado pelas reações de oxidação (exotérmicas) suporta o calor necessário para as reações de gaseificação endotérmica, já em um gaseificador todas as reações químicas podem ocorrer simultaneamente. O tratamento de gaseificação da biomassa é bem estudado e comercialmente implementado em comparação com a

pirólise devido o produto obtido e facilmente acessível e requer menos trabalho pós-recuperação (WATSON *et al.*, 2018).

O principal produto é o *syngas*, ou seja, o gás de síntese, no qual quando se controla a quantidade de ar transformando hidrocarbonetos em monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrogênio que pode ser usado em geradores de eletricidade ou em caldeiras para produzir energia. A gaseificação como outras técnicas de processamento também é influenciada pelas condições da reação, incluindo temperatura de pico, tempo de residência e taxa de aquecimento. Da mesma forma, a atmosfera dentro da câmara de reação também afeta a propriedades resultantes de *syngas* e char (ZHANG *et al.*, 2016).

O processo de gaseificação consiste em quatro etapas principais: oxidação, secagem, pirólise e redução, na qual a biomassa é exposta a oxidação de altas temperaturas (800-1500 °C) para convertê-lo em uma mistura de gás combustível.

A baixa energia o gás produzido pode ser queimado diretamente ou usado como combustível para motores a gás e turbinas a gás, enquanto a energia média gás pode ser usado para a produção de produtos químicos (MOLINO; CHIANESE; MUSMARRA, 2016)

3.4.3 Pirólise

Com a exaustão dos combustíveis fósseis e a preocupação de proteção, a utilização de recursos de biomassa atraiu um crescente interesse mundial. Tendo a pirólise como uma das promissoras rotas de conversão termoquímica, desempenhando um papel vital na conversão de biomassa. A pirólise pode ser descrita como a decomposição térmica da estrutura molecular da biomassa em três produtos diferentes: bio-óleo (fase líquida), biocarvão (char fase sólida) e gás (fase gasosa) onde a quantidade de cada fase poder variar de acordo com as propriedades físico-químicas da biomassa (ZHANG *et al.*, 2016).

Este processo é composto principalmente por dois estágios de decomposição, ou seja, primário e secundário. Durante o primário o estágio de desidratação, desidrogenação e processo de descarboxilação. Após a conclusão da reação primária, iniciasse a reação secundária que envolve o

craqueamento de grandes moléculas e transformação de sólidos em biochar e gases (BHATIA *et al.*, 2021).

Uma excelente alternativa para cumprimento desses objetivos é o processo de conversão de RSU por pirólise, o qual ocorre em temperaturas relativamente baixas em torno de 500 °C até o início do regime de gaseificação intensiva. A pirólise é considerada um processo de obtenção de energia renovável, isso porque a biomassa libera sua energia em forma de calor e o carbono é transformado em CO₂. Neste processo só restitui a atmosfera o CO₂ absorvido pela planta em seu crescimento, não contribuindo para o efeito estufa, ao contrário do que acontece com os combustíveis fósseis (CHHABRA *et al.*, 2019; IBRAHIN; IBRAHIN; CANTUÁRIA, 2015).

O tratamento pela degradação termoquímica dos resíduos por pirólise possui potencial para reduzir o volume final do material utilizado na alimentação do processo em até 90%, com base no peso da tonelada úmida, além de apresentar produtos de interesse comercial. Dependendo da temperatura, tempo de residência e a razão de aquecimento empregada no processo, convertendo-se em diversos subprodutos gases H₂, CH₄, CO (responsável pelo agravamento do efeito estufa); combustíveis líquidos (HC, álcoois, bio-óleo); resíduos sólidos (escória, char), permitindo recuperação de energia com balanço energético sempre positivo (LEME, FERNANDES e LOPES, 2017).

Embora a pirólise seja um processo que utilize razão de aquecimento controlado, fatores como tipo de biomassa, composição química, tamanho da partícula, tempo de pirólise e temperatura empregada podem influenciar no processo, uma vez que, a temperatura, geralmente, é o fator mais relevante, pois implica com os produtos da pirólise (BRIDGWATER, 2015).

O processamento de degradação termoquímica por meio da pirólise contém três subcategorias principais. A pirólise lenta, onde o tempo de residência dos sólidos é muito longo, sendo da ordem de minutos, horas ou até mesmo dias. Com temperaturas baixas em torno de 400°C, neste processo é utilizado principalmente para a produção de carvão (*char*). O pirólise intermediário, onde o tempo de residência do vapor quente é moderado de 10-20s com temperaturas em torno de 500°C, diminuindo o rendimento de líquido e aumenta o rendimento de char e gás. E por fim a pirólise rápida, onde o tempo de residência do gás é da ordem de segundos ou milésimos de segundo, com temperatura moderada em torno de 500°C, neste tipo de pirólise é utilizado sobretudo quando se deseja obter um alto rendimento de bio-óleo (BRIDGWATER, 2015).

De acordo com os autores Silva, *et al.*, (2018) *apud* Lima (2018), a carbonização dos RSU é

obtida cinco itens que podem integrar novamente a cadeia produtiva. Para cada cinco toneladas de resíduos são obtidos aproximadamente:

- Óleo vegetal = 32 litros;
- Água ácida = 18 litros;
- Lignina = 12 litros;
- Alcatrão = 18 litros;
- Pó de carvão = 2 toneladas.

De cada 5 toneladas de resíduos sobram aproximadamente 2 toneladas de pó de carvão que podem ser encaminhadas para prensa. Os briquetes resultantes do processo podem ser aproveitados de diferentes formas, inclusive como fonte de energia para geração de eletricidade. Em análise realizada a pedido do Núcleo, o poder calorífico ficou entre 3.384 e 6.460 kcal/kg (SILVA, RODAS e MARÇAL, 2018).

Visando a minimização da construção de aterros sanitários, no qual contaminam os corpos d'água a recuperação energética se torna adequada para estes resíduos, tendo a tecnologia de pirólise com uma ampla gama de aplicações, onde a cada tonelada de RSU misto, ou seja, misturado aproximadamente gera uma faixa média de energia de 500 – 600kWh (HASAN et., al, 2021).

De acordo com a autora Passos (2019) não só o processo de pirolise é eficiente para o tratamento dos resíduos como por meio da gaseificação, no qual a Usina Termoelétrica de Mafra em Santa Catarina funciona desde 2017, reduzindo uma tonelada de RSU para 100kg de cinzas, com isso oferecendo uma alternativa ambientalmente adequada.

3.5 Procedimentos de Caracterização da Biomassa

Para um processo de conversão adequado, o primeiro passo é a identificação e caracterização das propriedades inerentes da biomassa. O conhecimento dessas propriedades é necessário para o desenvolvimento de sistemas térmicos que utilizem a biomassa eficientemente como a matéria-prima.

Esta caracterização tem relação direta com as características químicas, físicas e térmicas do

material, demonstrando os potenciais de aplicação, os possíveis problemas ambientais e operacionais e a viabilidade do material para futura geração de energia renovável. Perante o exposto, as principais propriedades de interesse no estudo de um combustível, são as análises: (MCKENDRY, 2002a; VASSILEV *et al.*, 2010)

- Análise Imediata;
- Poder Calorífico;
- Análise termogravimétrica (TGA) e Análise do comportamento térmico;
- Fluorescência de Raios X das cinzas.

3.5.1 Análise Imediata

A análise imediata divide-se em quatro ensaios distintos, sendo o percentual em massa: umidade (%U), material volátil (%MV), carbono fixo (%CF) e de cinzas (%Z). A umidade será realizada a partir do pré-tratamento de secagem em estufa, uma vez que a análise imediata utiliza como parâmetro a biomassa em base seca. Com a secagem a perda de água é conseguida facilmente, essa perda é importante, pois quanto mais água presente na biomassa menor será a qualidade do combustível, elevados teores de umidade retardam a ignição e são prejudiciais à combustão, influenciando também o processo de pirólise (DEMIRBAS, 2004).

Para determinação do material volátil, o seu aquecimento deve cumprir um padrão de temperatura, razão de aquecimento e ambiente controlado, haja vista sua dependência volátil a essas variáveis.

O teor de cinzas é formado por meio da combustão dos resíduos orgânicos e oxidação dos inorgânicos em um forno mufla.

Quanto menor esse percentual menor o risco de incrustações nos equipamentos, ou seja, altos teores de cinzas podem ocasionar perda de energia durante a queima, reduzir o poder calorífico do combustível e influenciar na transferência de calor do sistema (BORGES, 2015).

O teor de carbono fixo representa a quantidade de carbono sólido após a liberação dos compostos voláteis excluindo-se a umidade e a cinza (CAI *et al.*, 2017). O carbono fixo caracteriza o percentual de carbono que ficou preso num dado material após a liberação dos materiais voláteis. Geralmente biomassas que apresentam elevado teor de carbono fixo possuem também alto poder calorífico (BASU, 2013).

3.5.2 *Análise de Poder Calorífico*

O poder calorífico é a quantidade de energia liberada em forma de calor, durante a combustão completa. O poder calorífico de um combustível pode ser expresso de duas formas, sendo elas poder calorífico superior (poder calorífico bruto), e o poder calorífico inferior (poder calorífico líquido).

Na conversão da biomassa considera-se o poder calorífico superior (PCS) como parâmetros para cálculos, tendo em vista o pré-tratamento realizado antes das análises, em geral quanto mais elevado o PCS melhor a biomassa (CORTEZ *et al.*, 2008).

O PCS representa o valor máximo de energia contida no combustível que pode ser aproveitado durante o processo, sob a condição que a água gerada se encontre no estado líquido, estando incluso neste valor o calor latente de vaporização da água contida no combustível. Por sua vez, o PCI corresponde o valor de energia caso tenha ocorrido a evaporação da água, desconsiderando o calor latente de vaporização da água (SILVA, 2017).

O poder calorífico é a propriedade físico-química com maior importância no processo decisório de seleção de um combustível para uso em processos termoquímicos, uma vez que, determina o valor energético da amostra (DAL-BÓ, 2016).

3.5.3 *Análise de Fluorescência de Raios X (FRX)*

A fluorescência de raios X é um método analítico utilizado principalmente para determinação, qualitativa e quantitativa, da composição elementar de uma amostra medida a partir da intensidade dos raios X emitidos pelos elementos da amostra, mediante sua excitação por partículas de elétrons, prótons ou íons. A amostra se apresenta de três formas, sólida, em pó ou líquida (NASCIMENTO, 1999 *apud* HASCHKE, 2014).

Na análise por espectrometria de fluorescência de raios X a amostra é excitada por uma radiação altamente energética (Raios X). Os raios X, por sua vez, tem a capacidade de excitar elétrons de um átomo em níveis internos, deste modo quando um átomo recebe essa descarga de raios X o elétron é retirado de seu nível de energia gerando uma lacuna, esta lacuna é preenchida por um elétron de maior energia liberando energia quântica na forma de fóton (DUTRA e GOMES, 1984 *apud* HASCHKE, 2014).

Esta análise possibilita identificar os componentes inorgânicos da amostra (teores de Si, Al, Fe, Ca, P, Mg, K, Na), componentes de grande valia, visto que, as baixas concentrações podem catalisar ou inibir a degradação da matéria orgânica (CONSUEGRA, 2013).

De acordo com os autores Dutra e Gomes (1984) existem diversas vantagens na técnica de espectrometria de fluorescência de raios X, além do caráter não-destrutivo, dentre elas se destacam: a simplicidade do espectro, comportamento previsível dos elementos, boa reciprocidade, ampla capacidade de detecção (cobrindo um número considerável de elementos), grande versatilidade analítica (amostras na forma líquida, sólida ou sob a forma de pó) e rapidez na execução das análises.

3.5.4 Análise Termogravimétrica (TGA) e Análise do Comportamento Térmico

A análise termogravimétrica (TGA) é um conjunto de técnicas capazes de monitorar a propriedade física de uma dada substância e seus produtos de reação enquanto a amostra é submetida a uma programação de temperatura. A TGA registra a decomposição térmica da massa, em função da temperatura ou do tempo sobre atmosfera controlada, enquanto a DTG (termogravimétrica derivada) permite conhecer a taxa de perda da massa em função do tempo e da temperatura. Será também analisado o comportamento térmico que a massa teve em cada ponto de temperatura (ROWELL, 2005).

Diferentes parâmetros serão analisados, como a variação da massa da amostra, o diâmetro da partícula, a razão de aquecimento e a composição da atmosfera. Para realização a amostra será colocada numa balança termogravimétrica e aquecida sobre um fluxo de atmosfera inerte, oxidante ou reativa; podendo ser realizada de três formas: isotérmico, não isotérmico (ou dinâmico) e semi-isotérmico (ou quase-isotérmico). No modo isotérmico, a temperatura é constante durante todo o experimento e a amostra é monitorada em função do tempo de exposição à decomposição térmica; no modo dinâmico, a amostra é exposta a um programa de temperatura, geralmente a uma velocidade linear; e no modo semi-isotérmico, a amostra é aquecida a programação de temperaturas não lineares (IONASHIRO, 2004).

Suas medições são usadas para determinar a estabilidade térmica e/ou oxidativa dos materiais, assim como exibir a perda ou ganho de massa devido à perda de componentes, à decomposição dos polímeros, à combustão e os resíduos finais (como cinzas).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para o desdobramento do presente trabalho, traçou-se o panorama do desenvolvimento dos RSU, chegando ao atual cenário vivenciado pelos municípios do estado da Paraíba, tendo como norteamento a revisão bibliográfica, em que, contemplou-se desde os primórdios dos resíduos. Selecionou-se um município no Estado da Paraíba para a realização da coleta do material, advindo do lixão. Tendo em vista seu inadequado gerenciamento com os RSU o município em questão não autorizou a divulgação do nome, apenas a coleta dos resíduos. Pela razão de que o MPPB já havia encerrado as atividades do lixão, porém ao projetar a área de transbordo houve uma inadequada gestão, no qual, tornou-se um novo lixão.

Foi possível identificar o aproveitamento deste material submetendo-os ao processo de conversão térmica, no qual, estimou-se o potencial de aproveitamento energético.

As análises físicas/químicas e a determinação da composição constituem papel importante na caracterização da biomassa, para produção de energia, uma vez que a composição e a estrutura da biomassa têm forte influência na natureza e no rendimento do processo de transformação energética.

As análises envolvidas nestas caracterizações indicam o desempenho e a aplicação dos materiais estudados, os prováveis tratamentos necessários à otimização de processos, quais biomassas possuem maiores quantidades de energia.

4.1 Preparo da Matéria Prima

O preparo inicial se deu através da coleta dos resíduos sólidos urbanos de um município no Estado da Paraíba, no qual não passa por nenhuma segregação, ou seja, vindo todos misturados como demonstrado na Figura 8. Tendo em vista que este material vem em granulometrias diferenciadas, separa-se os RSU secos dos úmidos (resíduos orgânicos).

Figura 8. Área de coleta dos RSU



Fonte: Autora (2021).

Coletou-se em média 3kg de resíduos sólidos urbanos bastante heterogêneos. Após a coleta o RSU seco foi passado por um moinho de facas, com peneira de 5 milímetros como mostra na Figura 9, mesmo assim se fez necessário a utilização do liquidificador industrial para alcançar a granulometria adequada para as análises e em seguida utilizou-se a peneira de análise granulométrica na malha de 100 mesh. Enquanto isso os resíduos úmidos foram previamente secos na estufa com circulação e renovação de ar (modelo MA 035) em temperatura controlada de 105°C durante 3 horas, em seguida passando pelas mesmas etapas de trituração e peneiramento dos RSU secos.

Figura 9. Resíduos após o moinho de facas com peneira de 5mm.



Fonte: Autora (2021).

4.2 Análise Imediata

O desenvolvimento da análise imediata ocorreu no Laboratório de Materiais e Química Ambiental (LabMaQ), localizado no Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

O teor de umidade foi identificado através da balança Moisture Analyzer, modelo MF – 50, já os teores de material volátil e cinzas foram conduzidas de acordo com suas respectivas normas ASTM E872-82 (2019) e ASTM E1755-01 (2001), no qual foram calculados utilizando a equação 1 para materiais voláteis e equação 2 para encontrar cinzas, por fim o teor de carbono fixo foi obtido pela equação 3:

$$TM_v = (m_0 - m_r / m_0) * 100 (\%) \quad (1)$$

Onde:

TM_v - Teor de materiais voláteis;

m₀ - Massa da amostra antes do experimento, em g;

m_r - Massa residual após o experimento, em g.

$$T_{cinzas} = (m_0 / m_c) * 100 (\%) \quad (2)$$

Onde:

T_{cinzas} - Teor de cinzas;

m₀ - Massa da amostra antes do experimento, em g;

m_c - Massa de cinzas, em g.

$$TCF = 100 - (TM_v + T_{cinzas}) (\%) \quad (3)$$

Onde:

TCF - é o percentual em massa de carbono fixo;

TM_v - é o percentual em massa de material volátil e

T_{cinzas} - é o percentual em massa de cinzas.

4.3 Análise de Poder Calorífico

O cálculo do PCS foi determinado teoricamente a partir da análise imediata, por meio da correlação proposta por Nhuchhen & Salam (2012) (Equação 4), na qual a equação é função do teor de carbono fixo (CF), do teor do material volátil (MV) e do teor de cinzas (Z).

$$PCS (MJ.kg^{-1}) = 19,2880 - 0,2135 (MV/CF) + 0,0234 (CF/Z) - 1,9584 (Z/MV) \quad (4)$$

4.4 Análise de Fluorescência de Raios X (FRX)

Os compostos inorgânicos contidos na biomassa foram caracterizados e quantificados por meio da técnica de fluorescência de raios X (FRX) das cinzas dos RSU e do resíduo orgânico (RO). As cinzas são formadas por meio da combustão dos resíduos orgânicos e oxidação dos inorgânicos em um forno mufla, inicialmente utilizou-se a temperatura de 250°C por 30 minutos, em seguida elevou-se para 550°C por volta de 2 horas para assim acharmos as cinzas.

O equipamento utilizado para a técnica de FRX foi o Bruker S2 Ranger utilizando a radiação Pd or Ag *anode max*; *power 50 W, max*; *voltage 50 kV, max*; *current 2 mA*; XFlash® *Silicon Drift Detector*, localizado no Laboratório de Peneiras Moleculares (LABPEMOL) no Instituto de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

4.5 Análise Termogravimétrica (TGA) e Análise do Comportamento Térmico

Para verificar o comportamento dos resíduos sólidos secos e úmidos quando submetidos ao aumento de temperatura, foram realizadas análises termogravimétricas (TG) e termogravimetria diferencial (DTG). Estas análises foram realizadas no LabMaQ, utilizando o equipamento SDT 650, TA. Para estas análises, se utilizou atmosfera inerte, com gás nitrogênio (pureza de 99,99%) e ar sintético. Com programa de temperatura a partir da temperatura ambiente até 900 °C, a uma razão de aquecimento de 10 °C/min e vazão de gás de 100 mL/min. A massa da amostra foi de aproximadamente 10 mg em cadinho de alumina. Todas as análises foram realizadas em duplicata.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

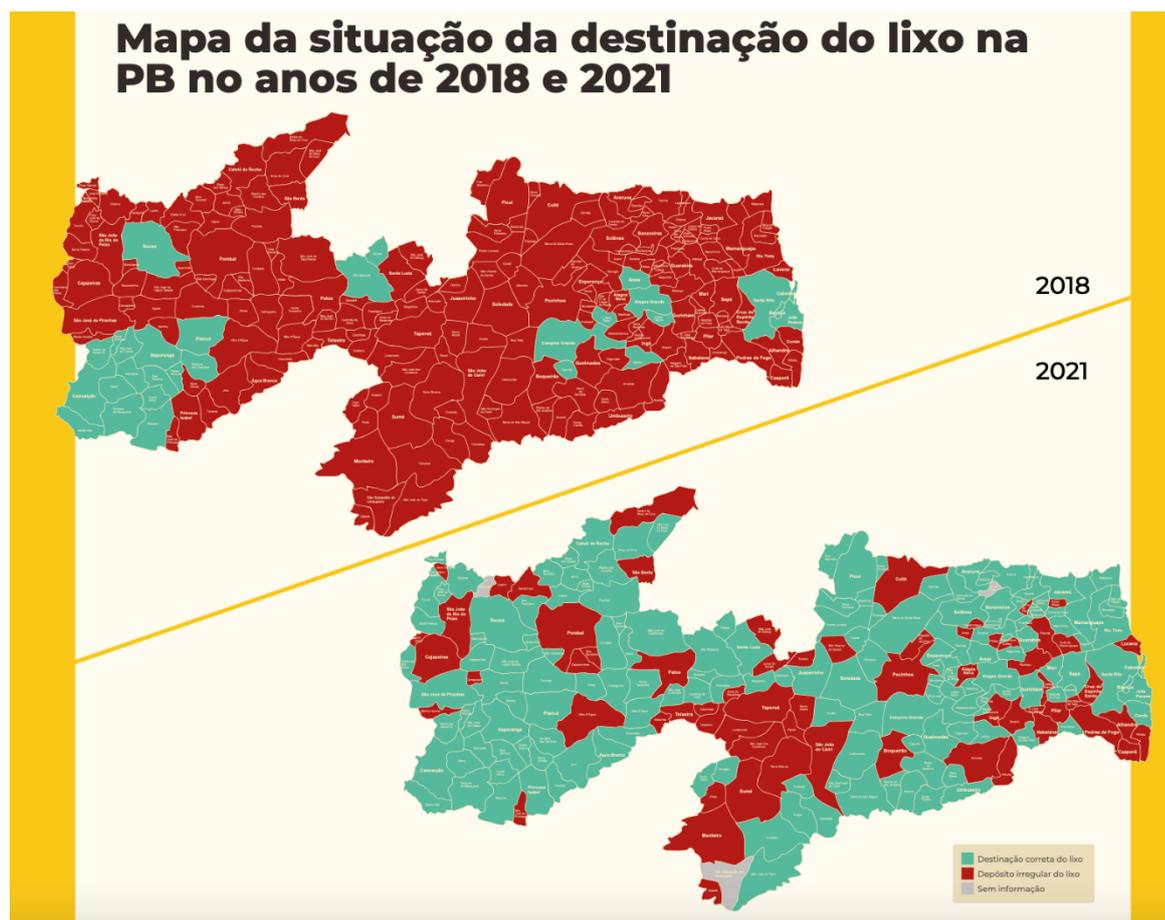
5.1 Panorama da situação dos RSU no Estado da Paraíba

De acordo com o Ministério Público da Paraíba (MPPB) (2021), de 2018 para 2021 houve um crescimento de mais de 550% dos municípios que encerraram os lixões, sendo 156 municípios de 223 destinando de maneira adequada. O Ministério Público determinou o encerramento dos lixões para 2020, no qual foi assinado um Termo de Ajuste de Conduta (TAC) entre o Ministério Público e os municípios, o qual ressalta a dificuldade que vem enfrentando os gestores para o encerramento (MPPB, 2021).

A realidade não é bem essa demonstrada pelo MPPB na Figura 10, ainda existem municípios que mesmo declarando legalmente o encerramento do lixão naquela área em outra local que deveria ser destinada para transbordo ocorre ilegalmente um novo lixão, como foi o caso do município abordado para este estudo, remetendo a falta de gestão dos gestores do município e a fiscalização dos órgãos competentes.

Tal problemática vem sendo recorrente em outros municípios, tendo em vista o inadequado gerenciamento com os RSU. Diversos municípios não permitiram a entrada em seus lixões temendo futuros problemas com os órgãos responsáveis, o gestor do município em estudo permitiu a realização de toda a coleta e levantamento fotográfico, mas sem a divulgação do nome.

Figura 10 – Mapa comparativo de 2018 e 2021 da destinação do lixo na Paraíba.



Fonte: MPPB (2021).

5.2 Análise Imediata dos Resíduos Sólidos Urbanos e dos Resíduos Orgânicos

O uso dos resíduos sólidos urbanos no setor de produção de energia ainda é baixo, sendo <6% de participação. No entanto, a parcela total da eletricidade produzida a partir de RSU cresceu mais de 200% desde 2000, provavelmente devido ao aumento do número de usinas de valorização térmica implantado ao longo do tempo e para a fração sintética superior vista gradualmente em resíduos, nomeadamente plásticos, tecidos artificiais e misturas de polímeros, que caracterizam tipicamente os RSU urbanos. Além disso, o fato de que a população está mais ciente das opções de alternativas para descartes das frações orgânicas, sendo uma dessas alternativas a compostagem, tendo em vista seu teor de umidade elevado (RAMOS; ROUBOA, 2020).

Para um melhor entendimento do material trabalhado é necessário começar caracterizando o mesmo, através da análise imediata a qual se divide em quatro ensaios distintos, sendo eles o teor de umidade (%U), material volátil (%MV), carbono fixo (%CF) e de cinzas (%Z). Os resultados obtidos pela análise imediata dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e dos resíduos orgânicos (RO) é apresentado nas tabelas 1 e 2 respectivamente.

Tabela 1. Análise imediata do RSU

Teores	Porcentagem %
Umidade	10,26
Material Volátil (base seca)	41,10
Cinzas (base seca)	32,20
Carbono Fixo (base seca)*	27,0

* calculado utilizando pela equação 3

Fonte: Autora (2021).

Na Tabela 1, nota-se que o teor de umidade do RSU ficou em 10%, podendo estar associado a eficiência de remoção de líquido durante o preparo da matéria. Além disto, outro fator que pode ter influenciado para este valor é a forma a qual o material é encontrado, sendo que o mesmo fica exposto ao Sol. O resultado encontrado é aceitável e apresenta boa aplicabilidade para processo termoquímico por necessitar de uma baixa quantidade de energia para sua remoção (MCKENDRY; 2002).

Na Tabela 1, os teores de material volátil (41,10%) e carbono fixo (27%), demonstram o percentual de massa dos compostos que podem ser devolatilizados. Levando em consideração aos teores de cinzas, percebe-se que o valor encontrado está acima dos valores obtidos em outros trabalhos como apresentado na tabela 2, uma vez que, altos teores de cinzas não são desejados, pois sucedem em baixos valores de PCS, além de que pode ocasionar perda de energia durante a queima e problemas com incrustações nos equipamentos (BORGES, 2015).

A maioria dos artigos encontrados analisam os resíduos separadamente, como é o caso dos autores Zhou *et al.*, 2014, que escolheram três tipos de RSU, sendo eles a casca de laranja, lenço de papel e PVC. Na tabela 2 é possível verificar os teores de cinzas, voláteis e carbono fixo dos autores,

comparando com a tabela 1, houve uma diferença no comparativo, podendo ser explicada pelo fato dos resíduos em estudo serem advindos de lixão sem separação.

Tabela 2. Análise imediata por Zhou

Resíduo	Cinzas %	Materiais Voláteis %	Carbono Fixo %	Picos da degradação térmica
Casca da laranja	2,91	76,49	20,60	226°C
PVC	0,0	94,93	5,07	250°C
Lenço de papel	0,52	90,47	9,01	353°C

Fonte: Elaboração própria a partir de Zhou, 2014.

A tabela 3 apresenta análise imediata do RO. Nota-se que o teor de umidade ficou acima do encontrado em literaturas, sendo 71,11%, tendo em vista que foi analisado apenas os resíduos orgânicos, no qual geralmente tem alto teor de umidade devido à presença dos alimentos, justificando a umidade encontrada nos resultados de RO. A alta umidade dos resíduos alimentares pode ter efeito dificultador sobre o processo de pirólise, interferindo na qualidade dos subprodutos.

De acordo com os autores HASAN et., al (2021) tendo em vista o elevado teor de umidade dos RO, os autores abordaram outro processo tecnológico para os resíduos orgânicos, com a elevada proporção de matéria orgânica biodegradável que contém. A conversão microbiológica é uma tecnologia de recuperação de energia, seu conteúdo orgânico é microbianamente degradado através do processo anaeróbico no qual ocorre livre de oxigênio, neste processo se obtém um rendimento de biogás de 23-265 m³ por tonelada de material residual úmido.

Em comparação com os resultados encontrados na análise imediata e os resultados encontrados pelos autores Yang *et al.*, (2018), obtiveram resultados para unidade 42,9%, material volátil 51,6%, cinza 44,3%, carbono fixo 4,1%, no qual os resíduos avaliados foram selecionados pelos autores contemplando pequenos pedaços de biomassa (madeira e grama), plásticos, materiais decompostos, inorgânicos, incluindo metal, cerâmica e areia.

Tabela 3. Análise imediata do RO.

Teores	Porcentagem %
Umidade (base úmida)	71,11
Material Volátil (base seca)	68,29
Cinzas (base seca)	21,43
Carbono Fixo (base seca)	10,27

Fonte: Autora (2021).

Os autores Maccarini *et al.*, (2020) também analisaram os resíduos separadamente, deixando os secar em condições normais, perdendo um percentual maior de umidade em base úmida, como apresentado na tabela 4.

Tabela 4. Teores mencionados por Maccarini

	Umidade	Cinzas	Voláteis	Carbono fixo
Papeis	1,87	26,88	62,76	8,49
PVC	0,42	26,87	64,87	7,84
Pó de serra	4,13	2,02	77,72	16,13
Roupas de algodão	1,58	1,00	84,16	13,26
Vegetais	7,24	12,66	68,48	11,62

Fonte: Elaboração própria a partir de Maccarini, 2020.

O enriquecimento com os resíduos alimentares tem baixos valores de aquecimento, ficando a umidade entre 50% revelando a importância da triagem de constituintes entre os RO e os RSU com altos valores caloríficos e pré-secagem das matérias-primas para maximizar a energia total recuperada do resíduo durante a pirólise (SHUN *et al.*, 2020).

5.3 Poder Calorífico dos RSU e do RO

Um fator importante no conhecimento da composição química elementar da biomassa é a sua relação com o poder calorífico. O poder calorífico é um importante parâmetro que representa a energia total liberada durante a queima completa de um combustível. O poder calorífico pode ser avaliado, qualitativamente, através da razão atômica entre oxigênio-carbono (O/C) e hidrogênio-carbono (H/C) da biomassa.

Em relação aos valores de poder calorífico encontrado pelos autores Komilis *et al.*, (2011), no qual foram analisados de maneira individual os resíduos. Tomando como base as análises dos autores, destacou-se alguns resíduos na tabela 5 que são encontrados facilmente nos lixões, verificando quais poderão ter uma boa aplicabilidade no seu aproveitamento para fins energéticos.

Tabela 5. Poder Calorífico do RSU e RO em comparação com a literatura.

Resíduos	Poder Calorífico (MJ/kg¹ seco)	Autor
RSU	17,82	Este estudo (2021)
RO	20,13	Este estudo (2021)
Papelão	12,11	Komilis (2011)
Papel Higiênico	15,93	Komilis (2011)
Revistas	12,17	Komilis (2011)
Tetrapack	17,51	Komilis (2011)
Carne crua	23,89	Komilis (2011)
Carne cozida	25,33	Komilis (2011)
Legumes	14,63	Komilis (2011)
Frutas	15,33	Komilis (2011)
Gramma	18,12	Komilis (2011)
Garrafa PET	22,86	Komilis (2011)
PVC	19,05	Komilis (2011)

Fonte: Elaboração Própria, (2011)

Mostra-se que os plásticos exceto o PVC tiveram os maiores teores de energia entre todos os componentes orgânicos de RSU, seguido por algum desperdício de alimentos componentes (carnes e gorduras), resíduos de grama e resíduos de papel. A fração orgânica incluindo plásticos misturado teve um valor específico de aproximadamente 4000 kcal seco kg⁻¹ (% 16.500 kJ seco kg⁻¹). Com base nisso, o poder calorífico dos resíduos misturados (orgânicos e inorgânicos), espera-se ser 3280 e 3412 kcal kg⁻¹ seco, com a suposição de que o a fração orgânica tem conteúdo de energia zero (KOMILIS *et al.*, 2011).

Os autores Yufeng Du *et al.*, (2021) trouxeram de uma maneira geral o valor calorífico dos resíduos, ficando cerca de 25-40 MJ/m³, o que é equivalente ao gás natural. O gás de pirólise é rico em hidrocarbonetos e seu valor calorífico é alto, tendo para fins industriais, refino de petróleo bruto, produção de metanol e amônia e sólidos substitutos de combustível. Os componentes deste combustível são principalmente plásticos, borracha, biomassa e tecidos refratários à degradação, gerando no final do processo, produtos valiosos com alto poder calorífico.

Os teores teóricos do PCS obtidos para os RO foram superiores aos de RSU, tendo em vista que o teor de CF e MV encontrado na análise imediata, uma vez que, quanto maiores os teores de CF e menor o teor de MV, maior será o PCS. Ficando o RO com o poder calorífico em 20,13 MJ/kg e o RSU em 17,82 MJ/kg. Logo, por meio desses resultados percebe-se que o RSU e RO poderão ter uma boa aplicabilidade no seu aproveitamento para fins energéticos, dado que, os teores de PCS são comparáveis aos dos combustíveis tradicionais de biomassa (SILVA, 2019).

5.4 Composição Elementar das Cinzas por FRX

Na tabela 6 apresentam os principais elementos químicos existentes no RSU e no RO, obtidos através da análise de fluorescência de raios X. Existem compostos inorgânicos, tais como potássio, sódio, cálcio e magnésio, podendo ser encontrados na forma de óxidos, silicatos, carbonatos, sulfatos, cloridratos e fosfatos. Estes compostos inorgânicos podem catalisar ou retardar as reações químicas durante a gaseificação e a pirólise, logo a composição pode ou não ser benéfica para todo o sistema operacional (YILDIZ *et al.*, 2015).

Nota-se que o óxido de silício (SiO₂) com 31,77% é o componente mais abundante nos

resultados do RSU. No entanto, conforme o rendimento de líquido formado durante a pirólise da celulose é menor na presença de óxido de silício, quando comparado com os outros óxidos (FABBRI, TORRI E BARAVELLI; 2007).

Os principais óxidos constituintes foram: SiO₂ (31,77%), CaO (24,63%), e Al₂O₃ (11,46%). Esses óxidos podem ter efeito fundente na temperatura de queima por volta de 1000 °C, podendo contribuir para melhorar as propriedades tecnológicas do material na etapa de queima através da redução de porosidade (PASSOS; 2019).

Tabela 6. Composição química elementar dos compostos inorgânicos presente no RSU e no RO via FRX, em base seca.

Elementos Inorgânicos	Composição Elementar	Composição Elementar
	Cinzas RSU (%)	Cinzas RO (%)
SiO ₂	31,77	2,51
CaO	24,63	59,31
Al ₂ O ₃	11,46	1,10
Fe ₂ O ₃	8,49	0,18
K ₂ O	5,80	23,46
MgO	5,2	2,9
Na ₂ O	2,9	0,8
SO ₃	2,6	0,81
P ₂ O ₅	2,49	2,73
Cl	2,30	5,97
TiO ₂	1,57	-
Cr ₂ O ₃	0,28	-
ZnO	0,23	0,02
MnO	0,08	0,07
ZrO ₂	0,06	-
SrO	0,06	0,11
NiO	0,04	-
CuO	0,04	-
PbO	0,02	-

SnO ₂	0,01	0,01
Br	0,01	0,01

Fonte: Autora (2021)

No FRX do RO é o óxido de cálcio (CaO) o componente mais abundante, com 59,31% esse elemento é normalmente empregado como catalisador nas reações de pirólise, por causa da sua eficácia de desoxigenação de ácidos na forma de CO₂.

O potássio na forma de óxido (K₂O) é o segundo componente em maior concentração, com 23,46% como apresentado na Tabela 7. Em processo de combustão o potássio, juntamente com o silício, apresenta um efeito negativo ao sistema, pois estes compostos podem reagir formando álcali silicatos, o qual fundem em baixas temperaturas. Por outro lado, no processo de pirólise, a presença de potássio apresenta um ponto positivo na catálise da biomassa, pois este componente promove a formação de compostos moleculares leves e minimiza a formação de levoglucosano a partir da celulose (EOM, I. *et al.*, 2012).

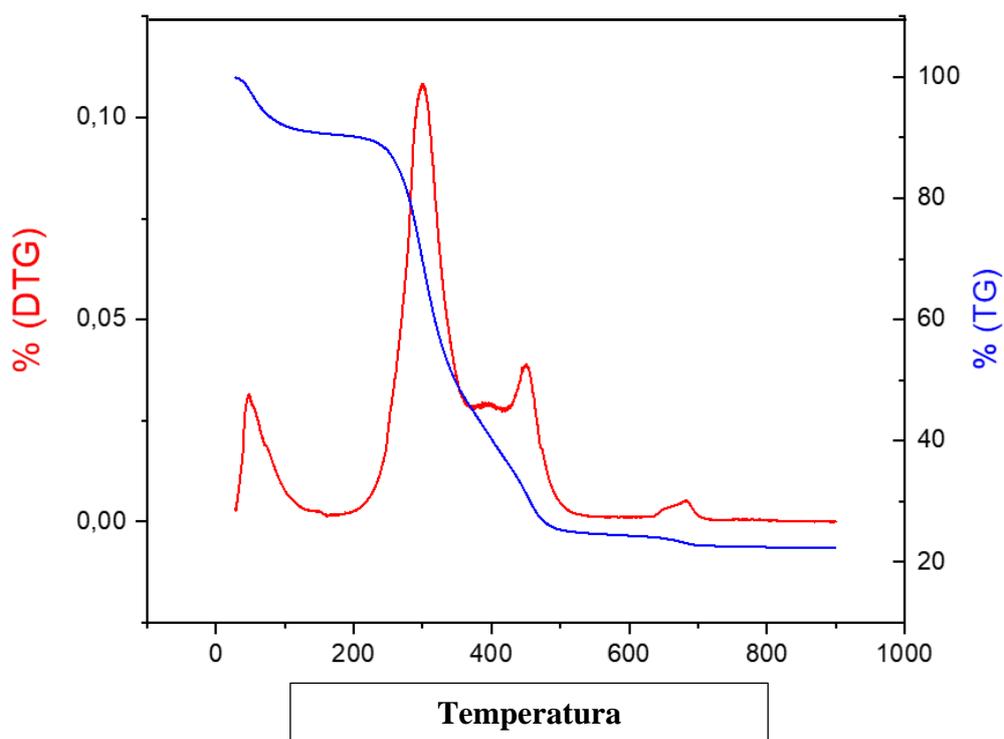
A ação dos metais alcalinos e alcalinos terrosos na pirólise proporciona a formação de *char*, pois aumentam o rendimento de resíduo final, e minimizam a formação de compostos gasosos (KAN, STREZOV e EVANS, 2016). Além disto, a presença desses compostos reduz significativamente a temperatura de degradação da biomassa, o qual favorece processos em escala industrial na produção de biochar.

5.5 Análise Termogravimétrica

As análises termogravimétricas do RSU e RO estão representadas nas Figuras 11 a 14 a seguir, trazendo a sobreposição da curva termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG) em função do tempo. O perfil da curva TG é representado pela linha azul, evidencia a perda de massa da amostra ao longo do aumento da temperatura dado por meio de atmosfera controlada. A curva DTG, representada pelos picos de temperatura, evidencia as perdas de massa ao longo de todo o experimento e é ilustrada na cor vermelha.

Por meio da análise da amostra de RSU, verificou-se na Figura 11 que na atmosfera de ar sintético o primeiro pico de perda de massa ocorreu aos 28,74 °C com perda de massa de 9,39%, enquanto na atmosfera de nitrogênio o pico formou-se aos 35,23 °C com perda de massa de 5,4%, ambos provenientes do desprendimento de água existente na superfície do material como apresentado na Figura 12. A partir da temperatura ambiente até aproximadamente 150 °C ocorre a perda de umidade, no qual corresponde ao processo de secagem.

Figura 11 Curva de TG e DTG do RSU com ar sintético



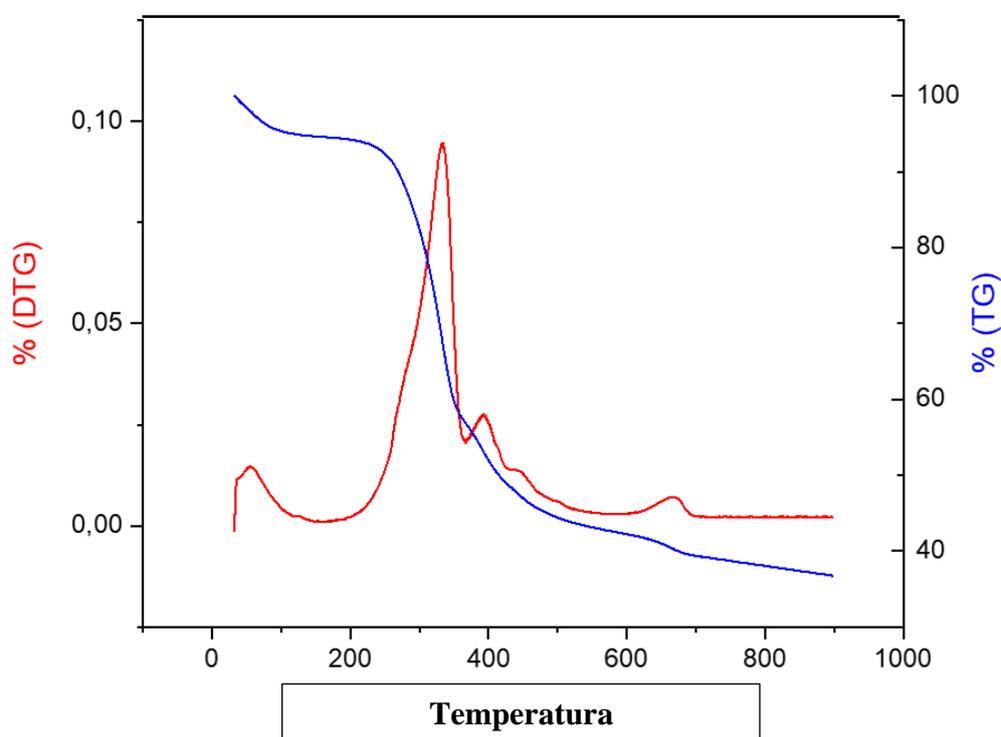
Fonte: Autora (2021)

A temperatura de ignição se dá através da liberação dos voláteis, por volta dos 214 °C na qual inicia-se o processo de queima. A decomposição da hemicelulose (xylose, glucose, galactose, manose) acaba sendo muito rápida, em faixa de temperatura compreendida entre 200 e 350 °C, sobretudo até os 315 °C quando iniciasse a decomposição da celulose, ocorrendo a degradação simultânea (DEMIRBAS, 2005; PENG *et al.*, 2011; PENG *et al.*, 2012; YANG *et al.*, 2007).

Elevadas temperaturas indicam a análise de materiais mais pesados, como a decomposição de materiais voláteis intensificada por volta dos 500 °C, no qual a lignina é degradada desde os 160 °C até aproximadamente os 900 °C (ÓRFÃO *et al.*, 1999; YANG *et al.*, 2007).

Ao chegar à temperatura de 218°C o RSU com ar sintético, mostra que a massa começa a diminuir e o fluxo de calor aumentar na mesma proporção, porém de maneira inversa. Já no processo de pirólise com o nitrogênio é mais linear sem muita variação no fluxo de calor no nitrogênio, até 250°C só tinha perdido 8% da massa, porém no intervalo de temperatura de 250 a 420°C houve uma perda considerável de massa, sendo de 50% mantendo-se na faixa de temperatura dos 420 °C à 900 °C perdeu mais de 14% da massa, finalizando o experimento com 36,8% da massa original.

Figura 12 Curva de TG e DTG do RSU com nitrogênio



Fonte: Autora (2021)

Notasse uma diferença entre a utilização do ar sintético para o nitrogênio, demonstrando no processo final um percentual de redução em torno de 14% no volume da massa com a utilização do ar sintético.

Tabela 7 Perda de massa da amostra de RSU

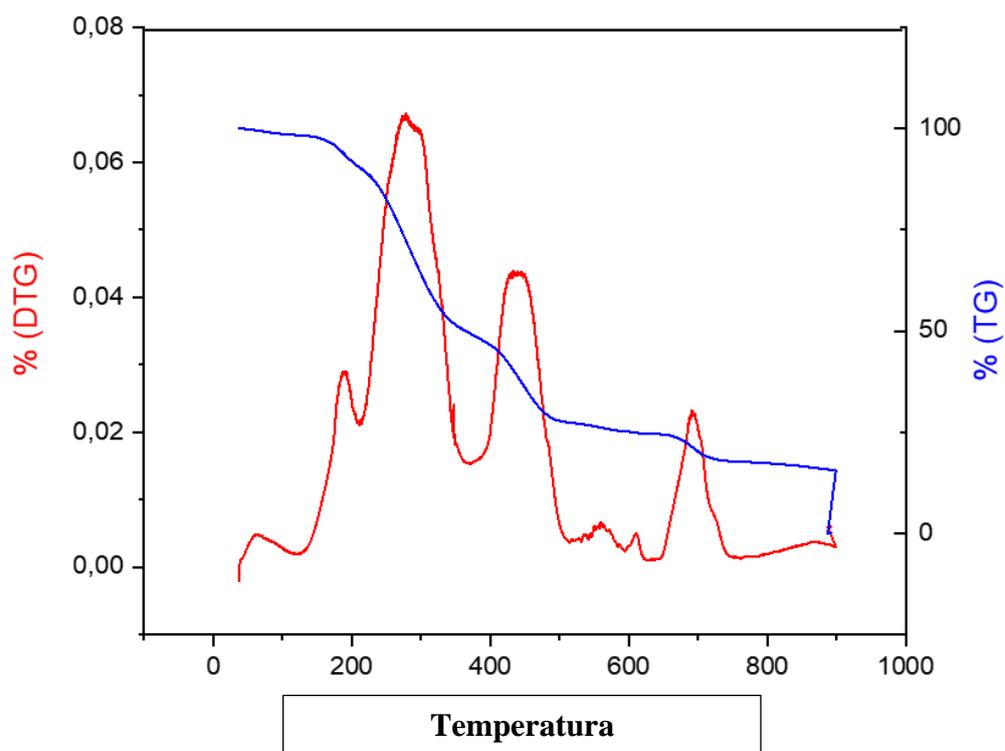
Faixas de Temperatura (°C)*	Perda de massa com Ar Sintético em %	Perda de massa com Nitrogênio %
< 100	8,07	4,66
100 – 250	12,23	7,7
250 – 350	50,72	40,25
350 – 500	74,70	55,60
> 500	77,61	63,17
Resíduo Final	22,38	36,83

Fonte: Autora (2021)

Tendo em vista que tanto nas residências como a coleta destes resíduos são mantidos juntos, ou seja, sem separação se faz necessário para um melhor aproveitamento do RSU o processo de pirólise. De acordo com o autor HASAN et., al (2021) a maior quantidade de bio-óleo pode ser produzida quando a temperatura da reação encontrasse em 500 °C, este processo também gera biochar e gás de síntese, tendo rendimento de 24%, 27% e 49% respectivamente. Aumentando a temperatura para 700 °C diminui a produção de bio-óleo e biochar e aumenta a produção de gás de síntese, tendo rendimento de 20%, 15% e 80% respectivamente.

Por meio da análise da amostra de RO, Figura 13, verificou-se que na atmosfera de ar sintético o primeiro pico de perda de massa ocorreu aos 61,10% °C com perda de massa de 1,62%, enquanto na atmosfera de nitrogênio o pico formou-se aos 50,33°C com perda de massa de 1,2%, ambos provenientes do desprendimento de água existente na superfície do material como apresentado na Figura 14. A partir da temperatura ambiente até aproximadamente 150 °C ocorre a perda de umidade, no qual corresponde ao processo de secagem.

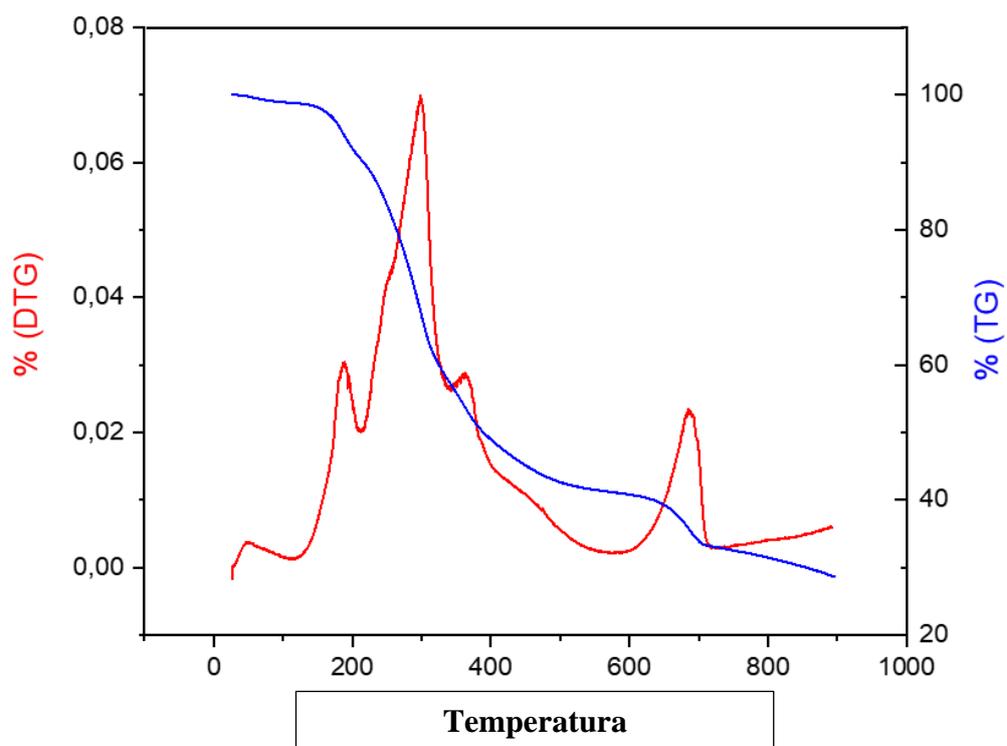
Figura 13 Curva de TG e DTG do RO com ar sintético



Fonte: Autora (2021)

A partir da temperatura ambiente até aproximadamente 210°C foi detectado uma perda de 10%, porém a perda mais considerável veio no próximo intervalo no qual atingiu-se a temperatura de 350°C apresentando uma perda de massa em torno de 40%. Houve também uma perda por volta de 15% no intervalo seguinte até a faixa de 500°C. Dentro do último intervalo a medida em que a temperatura subia não houve perdas de massa relevantes.

Figura 14 Curva de TG e DTG do RO com nitrogênio



Fonte: Autora (2021)

Tabela 8 Perda de massa da amostra de RO

Faixas de Temperatura (°C)*	Perda de massa com Ar Sintético em %	Perda de massa com Nitrogênio %
< 100	1,35	1,1
100 – 250	17,85	16,27
250 – 350	48,55	44,27
350 – 500	72,53	57,36
> 500	84,73	71,46
Resíduo Final	15,27	28,54

Fonte: Autora (2021)

As faixas de temperatura empregada nas tabelas 8 e 9 de perda de massa foram tomadas como base o que foi proposto por Connor e Piskorts (1994).

Na análise de RO com o nitrogênio, verificou-se que durante o experimento até a temperatura de 150°C não houve perda de massa relevante, a perda de massa ficou abaixo dos 2%, após este intervalo à medida que a temperatura aumentava o volume de massa da amostra começou a cair vertiginosamente, pois antes de alcançar os 400°C já havia perdido mais de 50% de sua massa original, desacelerando esta perda após os 500°C mantendo-se a perda uniforme até chegar o resíduo final de 28,54%.

6 CONCLUSÕES

Tendo em vista a grande quantidade de resíduos gerados no Brasil e seu pouco aproveitamento, se faz necessário políticas de conscientização de que existem outros meios de reaproveitamento destes resíduos, sendo o processo termoquímico viável gerando fonte de energia alternativa e renovável, contribuindo para a resolução da falta de espaço na construção de aterros sanitários e a redução dos lixões a céu aberto, na qual trazem consequências desastrosas. O estado da Paraíba não é o único a enfrentar problemas com a destinação ambientalmente adequada de seus resíduos sólidos, tal problemática é enfrentada a nível global.

Os resultados da análise imediata indicaram no RSU baixo teor de umidade (10,26%), podendo estar relacionado com a maneira em que o material foi encontrado (exposto ao sol), trazendo boa aplicabilidade para o processo termoquímico. O material volátil (41,10%) e o carbono fixo (27%) demonstraram o percentual de massa que pode ser devolatilizados, porém o alto teor de cinzas (32,20%) pode vir a ocasionar perda de energia durante a queima e incrustações nos equipamentos. Já no RO o teor de umidade (71,11%) ficou bem acima do encontrado nas literaturas, sendo normal por se tratar de resíduos alimentares, podendo interferir nos subprodutos. Sendo assim tornasse interessante que o RO utilize a rota de conversão microbiológica, obtendo o biogás como produto. O poder calorífico do RO ficou em 20,13MJ/kg e o RSU 17,82 MJ/kg, comparando com os resultados na literatura ambos poderão ter boa aplicabilidade para fins de aproveitamento energético. A desenvoltura do material ao passar pela análise termogravimétrica na atmosfera com ar sintético demonstrou uma perda de massa mais significativa em temperaturas baixas, diferente da atmosfera com nitrogênio na qual a temperatura foi elevada para ainda se obter uma menor perda de massa em relação ao ar sintético, ficando o RSU com resíduo final de 22,38% no ar sintético e no nitrogênio 36,83% e no RO foi de 15,27% e 28,54% respectivamente.

Investir no melhor aproveitamento de cada resíduo direcionando-o melhor rota tecnológica disponível, ocasiona resultados positivos para o meio ambiente, sendo eles diminuição de emissões de gases de efeito estufa, aproveitamento do potencial energético, a diminuição de áreas designadas à disposição destes resíduos, a redução de impactos ocasionados pelo lixo e a geração de renda advinda do novo caminho percorrido por esse resíduo são resultados positivos para o município.

O processo de conversão térmica vem com a perspectiva de gerar energia elétrica para atender

uma necessidade urgente da atual sociedade, na qual vem tentando erradicar os lixões em atividade. Contribuindo de maneira positiva na área de meio ambiente e aproveitamento energético, trazendo consigo conhecimentos para o uso sustentável dos resíduos sólidos na geração de energia.

Os resíduos poderão ter uma boa aplicabilidade no seu aproveitamento para fins energéticos por meio do processo de pirólise, sendo uma alternativa promissora, visto que, há uma grande disponibilidade de resíduos. Os valores de PCS encontrados são comparáveis aos dos combustíveis tradicionais de biomassa que já foram utilizadas para fins energéticos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a análise elementar do RSU e RO;
- Analisar o poder calorífico através da bomba calorimétrica;
- Analisar os produtos obtidos pelo reator pirolítico.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020. São Paulo: ABRELPE, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004 Classificação de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, p. 71. 2004.

ASTM E871-82(2013), **Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM E872-82(2019), **Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

ASTM E1534-93(2019), **Standard Test Method for Determination of Ash Content of Particulate Wood Fuels**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

BARCIOTTE, Maria Lucia. **Coleta Seletiva e Minimização de Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Integradora**. 1994. 226 f. Tese Doutorado - Curso de Saúde Pública, USP, São Paulo, 1994.

BASU, P. **Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory**. 2a. ed. Burlington: Academic Press, 2013. 551 p.

BHATIA, S. K. et al. Trends in renewable energy production employing biomass-based biochar. *Bioresource Technology*, p. 1 – 12, 2021.

BORGES, A. C. P. **Caracterização energética do cavaco de eucalyptus grandis “in natura” e torrefeito**. 2015. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

BRASIL, Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 15 jan. 2021.

BRASIL, Lei 14.026, de 15 de Julho de 2020. **Estabelece Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14026.htm>. Acesso em: 15 jan. 2021.

BRIDGWATER, A. V. Pyrolysis of biomass. In *Biomass Power for the World: Transformations to Effective Use*; **Pan Stanford Publishing** Pte. Ltd., 2015; pp 473–513.

CHHABRA, V.; BAMBERY, K.; BHATTACHARYA, S.; SHASTRI, Y. Thermal and in situ infrared analysis to characterise the slow pyrolysis of mixed municipal solid waste (MSW) and its components. **Renewable Energy**, In press, corrected proof, 2019.

Disponível em: <<http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/225>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GOMEZ, O. Biomassa para energia. Campinas, SP: Unicamp, 2008.

CONNOR, M. A.; PISKORZ, E. J. Advances in thermochemical biomass conversion. S.n.t., 1994, p. 1.502.

DAL-BÓ, V. **Potencialidades para o aproveitamento de biomassa de casca de café robusta para a geração de energia**. 2016. 136f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2016.

DEMIRBAS, A. Effect of initial moisture content on the yields of oily products from pyrolysis of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*: 71 (2), p. 803-815, 2004.

DEMIRBAS, A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. **Progress in Energy and Combustion Science**: 31, p. 171-192, 2005.

DUTRA, C. V.; GOMES, C. V. A Fluorescência de Raio-X na Geologia. In: FORMOSO, M. L. L., et al. **Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1984. Cap. 3, p. 84-120.

EOM, I. *et al.* Effect of essential inorganic metals on primary thermal degradation of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 104, p. 687-694, 2012.

FABBRI, D.; TORRI, C.; BARAVELLI, V. Effect of zeolites and nanopowder metal oxides on the distribution of chiral anhydrosugars evolved from pyrolysis of cellulose: An analytical study. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 80, p. 24-29, 2007.

FERREIRA, B. O.; LOBATO, L. C. S.; COLTURATO, L. F. D.; TORRES, E. O.; CHERNICHARO, C. A. L. **Strategies for energy recovery and gains associated with the implementation of a solid state batch methanization system for treating organic waste from the city of Rio de Janeiro - Brazil**. **Renewable Energy**, v. 146, p. 1976-1983, 2020.

FREIRE, Vitória de Andrade; SILVA, André Miranda da; SILVA, Didiane Saraiva da; FREIRE, Edvanda de Andrade; LIMA, Lígia Maria Ribeiro. **Diagnóstico dos danos ambientais, riscos e perigos presentes no lixão de Massaranduba – PB**. Research, Society And Development, v.9, n. 3, 19 fev. 2020. Research, Society and Development.

GÓMEZ, E. O. *et al.* Pirólise rápida de materiais lignocelulósicos para a obtenção de bióleo. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2008. Cap. 11, p. 732.

GOUVEIA, Nelson. **Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social**. *Ciência & Saúde Coletiva*, São Paulo, v. 17, n. 6, p. 1503-1510, jun. 2012. Universidade de São Paulo, (SciELO). Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S14131232012000600014#:~:text=Os%20v%C3%A1rios%20impactos%20ambientais%20decorrentes,humana%20a%20v%C3%A1rias%20subst%C3%A2ncias%20t%C3%B3xicas.> Acesso em: 11 jan. 2021.

- HASCHKE, M. **Laboratory Micro-X-Ray Fluorescence Spectroscopy: Instrumentation and Applications**. 1ª. ed. [S.l.]: Springer, v. 55, 2014.
- HASAN, M. M. et al. Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 1 – 19, 2021.
- IBRAHIN, F. I. D.; IBRAHIN, F. J.; CANTUÁRIA, E. R. **Análise ambiental: gerenciamento de resíduos e tratamento de efluentes**. São Paulo: Saraiva Educação, 2015.
- IONASHIRO, M. **Fundamentos da termogravimetria: análise térmica e diferencial / calorimetria exploratória diferencial**. 1ª ed. Editorial Giz – Araraquara, SP, 2004.
- KAN, T.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 57, p. 1126-1140, 2016.
- KARKANIA, V.; FANARA, E.; ZABANIOTOU, A. **Review of sustainable biomass pellets production – A study for agricultural residues pellets Market in Greece**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 3, p. 1426-1436, 2012.
- KOMILIS, D. et al. Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. *Waste Management*, p. 1 – 10, 2011.
- KUMAR, A. *et al.* A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 530-539, 2015.
- LEITAO, A. **Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o sec. XXI**. *Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting*, 2015, v. 1, n. 2, p. 150-171.
- LEME, G. R.; FERNANDES, D. M.; LOPES, C. L. **Utilização da Pirólise para o Tratamento de Resíduos no Brasil**. In: 8º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, 8., 2017, Curitiba.
- LIMA, Edvânia Bezerra de; OLIVEIRA, Denise dos Santos Colares de; OLIVEIRA, Cláudio Roberto Meira de. **RELAÇÃO SOCIEDADE E MEIO AMBIENTE: OS RESÍDUOS SÓLIDOS E SUAS IMPLICAÇÕES NA CIDADE DE IBITITÁ, BAHIA**. *Enciclopédia Biosfera: Centro Científico Conhecer*, Goiânia, v. 10, n. 18, p. 105-117, 12 abr. 2014. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2014c/pdf/relacao.pdf>> Acesso em: 12 jan. 2021.
- LÓPEZ-GONZÁLEZ, D.; FERNANDEZ-LOPEZ, M.; VALVERDE, J.L.; SANCHEZ SILVA, L. Thermogravimetric-mass spectrometric analysis on combustion of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, v. 143, p. 562–574, 2013.
- MAKARICHI, L.; JUTIDAMRONGPHN, W.; TECHATO, K. **The Evolution of waste-to-energy incineration: A review**. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. v. 91, p. 812-821, 2018.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, v. 83, p. 37–46, 2002a.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. **Bioresource Technology**, v. 83, p. 47–54, 2002b.

MENDES, Jéssica R. L.; ALMEIDA Karla. E. L.; MELO, João. M.; ABRANTES, Magjane. M. G. **Diagnóstico da disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Estado da Paraíba**. Rev.Bras.de Direito e Gestão Pública. Pombal, PB. abr./jun.2020.

Ministério do Meio Ambiente Secretaria de Qualidade Ambiental. **PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS 2020**. Disponível em: <<http://consultaspublicas.mma.gov.br/planares/wp-content/uploads/2020/07/Plano-Nacional-de-Res%C3%ADduos-S%C3%B3lidos-Consulta-P%C3%ABlica.pdf>> Acessado em: 18. Jan. 2021.

MIZIARA, Rosana. **Por uma História do Lixo**. Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente (INTERFACEHS). v.3, n.1, Artigo 6, jan./abril. 2008. Disponível em: <www.interfacehs.sp.senac.br> Acessado em: 18 jan. 2021.

MOLINO, A.; CHIANESE, S.; MUSMARRA, D. Biomass gasification technology: The state of the art overview. **J. Energy Chem.** 2016, 25, 10–25.

MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. **Energy & Fuels**, v.20, p. 848-889, 2006.

MPPB. Ministério Público da Paraíba. **Fim dos Lixões**. João Pessoa, PB, 2019

MPPB. Ministério Público da Paraíba. **Fim dos lixões: projeto aumento de 13% para 70% percentual de municípios com destinação correta de resíduos**. João Pessoa, PB, 2021.

NASCIMENTO, V. F. Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de Raios X por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF), 1999.

NHUCHHEN, D. R.; ABDUL SALAM, P. Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. **Fuel**, v. 99, p. 55–63, 2012.

OLIVEIRA, T. J. P. **Pirólise rápida de casca de soja: desenvolvimento do reator de leito fluidizado, análise do bio-óleo produzido e do vapor obtido da pirólise analítica**. Tese (Doutorado em Engenharia Química). 2015, 212p. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG. 2015.

ÓRFÃO, J. J. M.; ANTUNES, F. J. A.; FIGUEIREDO, J. L. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials three independent reactions model. **Fuel**: 78, p.349-358, 1999.

OSMAN, A. I.; ABDELKADER, A.; JOHNSTON, C. R.; MORGAN, K.; ROONEY, D. W. Thermal Investigation and Kinetic Modeling of Lignocellulosic Biomass Combustion for Energy Production and Other Applications. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v.56, n. 42, p. 12119–12130, 2017.

PARASCANU, M. M., PUIG-GAMERO, M., SOREANU, G., VALVERDE, J. L., & SANCHEZ-SILVA, L. (2019). Comparison of three Mexican biomasses valorization through combustion and gasification: Environmental and economic analysis. **Energy**. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116095>

PASSOS, Cristiane Arcoverde. **Artefatos cerâmicos a partir de cinzas de gaseificador de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Curitiba, 2019.

PENG, P.; PENG, F.; BIAN, J.; XU, F.; RUN-CANG, S.; KENNEDY, J. F. Isolation and structural characterization of hemicelluloses from the bamboo species *Phyllostachys incarnate* Wen. **Carbohydrate Polymers**: 86, p. 883-890. 2011.

PENG, H.; WANG, N.; HU, Z.; YU, Z.; LIU, Y.; ZHANG, J.; RUAN, R. Physicochemical characterization of hemicelluloses from bamboo (*Phyllostachys pubescens* Mazel) stem. **Industrial Crops and Products**: 37, p. 41-50, 2012.

PÉREZ, J. *et al.* Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose. **International Microbiology**, v.5, p. 53-63, 2002.

ROWELL, R. M. Handbook of wood chemistry and wood composites. CRC Press, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431, 2005.

ROWELL, R. M. *et al.* Cell wall chemistry. In: ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. New York: CRC Press, 2005. Cap. 3, p. 487.

SHEN, D.; JIN, W.; HU, J; XIAO, R.; LUO, K. **An overview on fast pyrolysis of the main constituents in lignocellulosic biomass to valued-added chemicals**: Structures, pathways and interactions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, p. 761-774, 2015.

SILVA, Chrystian Sthaylor Andrade *et al.* **PIRÓLISE: DESTINO, APROVEITAMENTO E ENERGIA ATRAVÉS DO LIXO**. Unitoledo, São Paulo, 2018. Disponível em: <<https://servicos.unitoledo.br/repositorio/handle/7574/2174>>. Acesso em: 15 jan. 2021.

SILVA, J. C. G. **Estudo dos parâmetros cinéticos da pirólise do bagaço de cana-de-açúcar**. 2017. 118f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

SOMORIN, T. O.; ADESOLA, S.; KOLAWOLE, A. **State-level assessment of the waste-to-energy potential (via incineration) of municipal solid wastes in Nigeria**. *Journal of Cleaner Production*. v.164, p. 804-815, 2017.

SOUZA, R. G. **16: E-waste situation and current practices in Brazil**. *Handbook of Electronic Waste Management*, 2020, p. 377-396.

TORRI, I. D. V. **Caracterização de bio-óleos obtidos por pirólise da serragem de Eucalyptus sp. (hardwood) e Picea abies (softwood) utilizando técnicas de cromatografia gasosa acoplada e espectrometria de massas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

UNFCCC. **Clarifications on definition of biomass and consideration of changes in carbon pools due to a CDM project activity**. EB-20. Apendice 8, p. 1. 2005.

VASSILEV, S. V. *et al.* An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, n. 89, p. 913–933, 2010.

VELLOSO, Marta Pimenta. **Os restos na história: percepções sobre resíduos.** Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 13, n. 6, p. 1953-1964, dez. 2008. SciELO. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232008000600031&lang=pt> Acesso em: 11 jan.2021.

WATSON, J.; ZHANG, Y.; SI, B.; CHEN, W. T.; DE SOUZA, R. Gasification of biowaste: A critical review and outlooks. **Renewable Sustainable Energy Rev.** 83, 1–17, 2018

YANG, H; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel:** 86, p. 1781-1788, 2007.

YILDIZ, G. *et al.* Effect of biomass ash in catalytic fast pyrolysis of pine wood. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 168–169, p. 203–211, 2015.

YUFENG, D. *et al.* A review on the pyrolysis of municipal solid waste of different compositions for gas production. *Fuel Processing Technology*, p. 1 – 13, 2021

ZAGO, Valéria Cristina Palmeira; BARROS, Raphael Tobias de Vasconcelos. **Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil:** do ordenamento jurídico à realidade. Engenharia Sanitária e Ambiental, Fap. UNIFESP. v. 24, n. 2, p. 219-228, abr. 2019.

ZHANG, Y.; ZHENG, Y.; YANG, M.; SONG, Y. Effect of fuel origin on synergy during cogasification of biomass and coal in CO₂. **Bioresour Technol;** 200:789–94; 2016.

ZHOU, H. *et al.* Interactions of three municipal solid waste components during co-pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, p. 1 – 7, 2014.