



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

GABRIELE FERREIRA FIEL E SILVA

PALOMA CARDOSO DE OLIVEIRA SANTOS

**APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE  
TUCURUÍ PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

TUCURUÍ  
2023

GABRIELE FERREIRA FIEL E SILVA

PALOMA CARDOSO DE OLIVEIRA SANTOS

**APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE  
TUCURUÍ PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Davi Edson Sales e Souza.

TUCURUÍ  
2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S586a Silva, Gabriele Ferreira Fiel E.  
APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO  
MUNICÍPIO DE TUCURUÍ PARA GERAÇÃO  
DE ENERGIA ELÉTRICA / Gabriele Ferreira Fiel E Silva, Paloma Cardoso  
de Oliveira Santos . — 2023.  
62 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Davi Edson Sales E Souza  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do  
Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Sanitária e  
Ambiental, Tucuruí, 2023.

1. Gestão de resíduos sólidos. 2. valorização energética. 3. rotas  
tecnológicas. 4. redução de gases estufas. I. Título.

CDD 628.44098115

---

GABRIELE FERREIRA FIEL E SILVA

PALOMA CARDOSO DE OLIVEIRA SANTOS

**APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE  
TUCURUÍ PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Data da aprovação: 13/12/2023

Conceito: Excelente

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente



**DAVI EDSON SALES E SOUZA**

Data: 29/12/2023 14:01:17-0300

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

---

Prof. Dr. Davi Edson Sales e Souza  
UFPA – CAMTUC (Orientador)

---

Documento assinado digitalmente



**RODRIGO CANDIDO PASSOS DA SILVA**

Data: 29/12/2023 12:10:34-0300

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

Documento assinado digitalmente



**JESSE LUIS PADILHA**

Data: 29/12/2023 17:19:15-0300

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

---

Prof. Dr. Rodrigo Cândido Passos da Silva  
Membro interno CAMTUC/FAESA/UFPA

Prof. Dr. Jessé Luís Padilha  
Membro externo CAMTUC/FEM/UFPA

Gabriele Ferreira Fiel e Silva

Dedico este momento tão sonhado as quatro pessoas mais importantes da minha vida, a minha querida mãe Jeane Fiel e aos meus amados filhos João Gabriel, Pedro Lucca e Ana Liz, vocês foram combustíveis diário para eu não desistir. Obrigada por toda ajuda e compreensão nestes longos anos, é por vocês que busco tornar meus sonhos em realidade e por isso minhas conquistas sempre serão dedicadas a vocês.

Paloma Cardoso de Oliveira Santos

Dedico esse momento aos meus familiares e amigos por todo apoio e incentivo durante este longo percurso. Vocês foram a base de tudo desde o início, estiveram ao meu lado quando precisei e tornaram os anos de graduação mais leve e agradável.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos os professores e colegas da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí, pelos aprendizados, atenção, companheirismo e ensinamentos. Em especial, ao professor Dr. Davi Edson Sales e Souza, por sua orientação, que com maestria conduziu os nossos passos nessa etapa e por toda paciência e parceria durante o decorrer do ano.

Gabriele Fiel e Paloma Cardoso

Agradeço primeiramente a Deus, que mesmo quando eu duvidei, nunca deixou de me amparar e me dar forças para continuar seguindo firme atrás dos meus sonhos.

Agradeço a minha mãe por todos seus esforços para me criar e educar, mesmo diante de todas as dificuldades. Agradeço por todas as vezes que ajudou a mim e minha família sem esperar retorno algum. Sou eternamente grata por tudo que fez e faz por mim.

Ao meu esposo Andrinho Gonçalves por toda ajuda, não só durante a graduação, por dividir o peso e muitas vezes assumir as responsabilidades da casa e do cuidado com nossas crianças. Obrigada por sempre me motivar e acreditar no meu potencial, você é incrível.

Agradeço às minhas comadres Magda Helena Silva e Cleide Soares por sempre me ajudarem e estarem disponíveis quando precisei. Vocês são parte importante dessa trajetória.

Agradeço a minha dupla Paloma Cardoso por toda ajuda durante a graduação e por sempre acreditar que eu podia fazer mais. Você foi um achado na minha vida, sou muito grata pela sua amizade e admiro muito a pessoa que você é, quando eu crescer quero ser igual a você.

Aos meus amigos Paloma Cardoso, Breno Corrêa, Lara Grazielle e Vitória Portilho que dividiram comigo o peso e as responsabilidades da graduação, os surtos sem vocês seriam muito mais difíceis de aguentar durante essa longa caminhada. Agradeço também a Esquadro Projetos e Consultoria, empresa que me apresentou um leque de oportunidades e horizontes, principalmente as minhas queridas diretoras Emilda, Luana e Paloma por sempre me motivarem, vocês foram responsáveis pela virada de chave que eu precisava para direcionar a minha formação.

Agradeço aos meus filhos João Gabriel e Pedro Lucca, vocês são minha motivação diária. Obrigada por entenderem quando a mamãe estava cansada e não conseguia brincar com vocês, obrigada por cooperarem quando eu pedia pra fazer um pouquinho de silêncio porque eu precisava

me concentrar, mesmo tão pequenos vocês entendiam a importância disso tudo para mim. Amo vocês incondicionalmente.

Agradeço aos colegas de handebol e a modalidade que me serviu de válvula de escape durante os dias difíceis. Por fim, sou grata a todas as pessoas que passaram na minha vida nestes cinco anos e que fizeram parte disso de uma forma ou de outra. Obrigada.

Gabriele Ferreira Fiel e Silva

Agradeço à Deus, primeiramente, por ter guiado o meu coração, por ter me dado forças e resiliência durante todas as adversidades.

À minha família, meus pais Márcio Oliveira Santos e Cláudia Cardoso de Oliveira, por serem meu pilar, minhas fontes de inspiração e por não medirem esforços para que eu tivesse uma educação de qualidade. Ao meu esposo, Marivaldo Ferreira, por ser meu apoiador e incentivador nos desafios da vida e por enfrentá-los comigo. Minhas irmãs, Paola Cardoso e Paulina Cardoso, por todo suporte, cuidado, carinho e atenção. E, à minha filha, Maitê, que vêm sendo minha força e motivação diária no último ano.

Aos meus amigos e colegas de turma que estiveram presentes nos momentos de felicidade e nos momentos de angústia, em especial ao meu grupo (Breno Maciel, Gabriele Fiel, Lara Grazielle e Vitória Portilho), por todo apoio, companheirismo e pela troca de experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como profissional, sem dúvidas vocês tornaram esses cinco anos mais leve.

Às amigas que construí no decorrer dos anos, Luana Gabrielly e Emilda Oliveira por sempre apoiarem e me instigarem a me desafiar dentro da vida acadêmica e profissional, muito obrigada.

À Empresa Júnior, Esquadro Projetos e Consultoria, por ter sido minha virada de chave tanto profissional, quanto pessoal, local onde aprendi a ser líder por exemplo. Levarei comigo, todos os aprendizados e todas as amigas que ela e o Movimento Empresa Júnior me proporcionaram.

E por fim, mas não menos importante, à minha amiga, parceira de faculdade e dupla de TCC Gabrielle Fiel que esteve presente na minha vida em muitos momentos em que precisei, principalmente, nessa etapa final da nossa graduação. Muito obrigada pela parceria e amizade.

Paloma Cardoso de Oliveira Santos

“Seja a mudança que você quer ver no mundo”.  
Mahatma Gandhi

## RESUMO

O encerramento de lixões e o aproveitamento energético de resíduos são questões ambientais de grande relevância nos dias de hoje, especialmente diante dos desafios relacionados à gestão sustentável de resíduos sólidos e à busca por alternativas mais eficientes e ambientalmente adequadas. O presente estudo objetiva estimular o encerramento da área de lixão à céu aberto em Tucuruí – Pará, para fins de atendimento à Política Nacional de Resíduos Sólidos, e estimar o potencial energético através do aproveitamento dos resíduos sólidos (RS) dispostos na área. A metodologia consistiu no levantamento bibliográfico do gerenciamento dos resíduos sólidos de Tucuruí. Em seguida, foram aplicadas duas rotas de geração de energia para aproveitar os RS da área, a partir da implantação de um aterro sanitário, sendo a rota 1 (aterro e captação de biogás de aterro) e a rota 2 (reciclagem, digestão anaeróbica e aterro). Os resultados apontaram a rota 2 como a mais eficiente, com a estimativa de geração de 36.204.192 kWh/ano. Esse total abasteceria 10.057 residências de baixa renda. Além disso, o aproveitamento evitaria 19.110,89 toneladas de metano (CH<sub>4</sub>), o equivalente a 401.328,69 toneladas de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) na atmosfera, diminuindo assim os gases do efeito estufa (GEE), além de atender aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Este trabalho reforça, também, a inclusão social e econômica dos catadores de materiais recicláveis, redução dos impactos negativos na saúde decorrentes do descarte inadequado de resíduos, prevenção da contaminação do solo e da água, produção de energia limpa e incentivo à economia circular.

Palavras-chave: Gestão de resíduos sólidos; valorização energética; rotas tecnológicas; redução de gases estufas.

## ABSTRACT

The closure of dumping ground and the energy use of waste are environmental issues of great relevance today, especially given the challenges related to the sustainable management of solid waste and the search for more efficient and environmentally appropriate alternatives. The present study aims to encourage the closure of the open dump area in Tucuruí – Pará, for the purpose of complying with the National Solid Waste Policy, and to estimate the energy potential through the use of solid waste (SW) disposed in the area. The methodology consisted of a bibliographical survey of solid waste management in Tucuruí. Then, two energy generation routes were applied to take advantage of the area's RS, from the implementation of a sanitary landfill, route 1 (landfill and landfill biogas capture) and route 2 (recycling, anaerobic digestion and landfill). The results showed route 2 as the most efficient, with an estimated generation of 36,204,192 kWh/year. This total would supply 10,057 low-income homes. Furthermore, the use would avoid 19,110.89 tons of methane (CH<sub>4</sub>), the equivalent of 401,328.69 tons of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in the atmosphere, thus reducing greenhouse gases (GHG), in addition to meeting the Development Objectives Sustainable (SDG). This work also reinforces the social and economic inclusion of recyclable material collectors, reduction of negative health impacts resulting from inadequate waste disposal, prevention of soil and water contamination, production of clean energy and encouragement of the circular economy.

**Keywords:** Solid waste management; energy recovery; technological routes; reduction of greenhouse gases.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos no Pará .....	19
Figura 1.2 – ALCA de Baião (1e 2) e Tucuruí (3 e 4).....	20
Figura 2.3 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	23
Figura 2.1 - Aterro Sanitário.....	28
Figura 2.2 – Estrutura de um lixão à céu aberto. ....	29
Figura 3.1 – Metodologia proposta.....	38
Figura 3.2 – Mapa de localização do município de Tucuruí .....	39
Figura 3.3 – Área de descarte final de RS do município de Tucuruí.....	40
Figura 3.4 – Crescimento da Área do Lixão de Tucuruí - PA (2013-2023).....	41
Figura 3.5 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos de Tucuruí-PA. ....	42
Figura 3.6 - Rota 1: Aterro com gás de aterro .....	44
Figura 3.7 - Rota 2: Reciclagem, digestão anaeróbica e aterro sanitário. ....	44
Figura 4.1 – Estimativa de residências abastecidas, por mês, com energia gerada das Rotas 1 e 2 .....	51



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos de Tucuruí-PA.....	42
Tabela 3.2 - Emissão de CO <sub>2</sub> e distância média de condução de automóveis Brasileiros.....	47
Tabela 4.1- Total de RS e de SER de Tucuruí-PA para o ano de 2022.....	48
Tabela 4.2 - Tipo de disposição final de RS na região Norte.....	48
Tabela 4.3 - Gerenciamento de RS em municípios do Pará.....	49
Tabela 4.4 - Potência elétrica e potência elétrica disponível por Rota.....	50
Tabela 4.5 - Consumo de Energia Elétrica Total (kWh) e Redução no consumo através da rota 2. .....	51
Tabela 4.6 – Estimativa de produção de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> e.....	54
Tabela 4.7– Número de automóveis circulantes no Brasil equivalentes a redução de gCO <sub>2</sub> /ano inerente a produção de energia da Rota 2.....	54



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	18
1.2	OBJETIVOS .....	21
1.2.1	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>21</b>
1.2.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>22</b>
2.1	ACORDOS INTERNACIONAIS: PERSPECTIVA DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	22
2.2	POLÍTICAS E REGULAMENTAÇÕES .....	25
2.3	GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	27
2.3.1	<b>Disposição Final de Resíduos Sólidos</b> .....	<b>28</b>
2.4	APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	29
2.5	ESTUDOS DE CASO SEMELHANTES .....	30
2.6	DESAFIOS DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	32
2.7	SUSTENTABILIDADE E VIABILIDADE.....	34
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>38</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	39
3.2	GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS .....	41
3.2.1	<b>Composição gravimétrica dos resíduos sólidos de Tucuruí</b> .....	<b>41</b>
3.2.2	<b>Estimativa de geração de resíduos sólidos de Tucuruí</b> .....	<b>43</b>
3.3	GERAÇÃO DE ENERGIA .....	43
3.3.1	<b>Rota 1 – Aterro sanitário com captação de biogás de aterro</b> .....	<b>44</b>
3.3.2	<b>Rota 2 – Reciclagem e aterro sanitário com digestão anaeróbia</b> .....	<b>44</b>
3.3.3	<b>Apresentação do modelo</b> .....	<b>45</b>
3.3.4	<b>Conversão de Potência Elétrica em Energia Elétrica</b> .....	<b>46</b>
3.4	ESTIMATIVA DE CO <sub>2</sub> EVITADO .....	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>48</b>
4.1	GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	48
4.2	ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA .....	50

4.3	ESTIMATIVA DE GÁS CARBÔNICO EVITADO .....	54
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>55</b>
6	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>57</b>

## 1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os problemas relacionados às atividades humanas e aos resíduos surgiram desde os primórdios das gerações, seja devido ao modelo de vida do homem ou oriundo da criação das primeiras aglomerações urbanas, que passaram respectivamente a interferir na saúde pública e no meio ambiente (MENDEZ; MAHLER; TAQUETTE, 2022). Sob o mesmo ponto de vista, Rocha, S., Rocha, R. e Lustosa (2017) afirmaram que com o desenvolvimento das cidades e da importância que os produtos passaram a ter na vida das pessoas, jamais se observou tanto resíduo gerado. Além disso, as soluções para essa problemática não surgem de maneira simultânea com a geração, ocasionando em um ritmo desenfreado de amontoados de materiais descartados. Diante disto, de forma emergencial e sem critérios técnicos, os vazadouros a céu aberto, comumente conhecidos como Áreas de Lixões a Céu Aberto (ALCA), são experimentadas como forma de disposição imediata dos resíduos de uma determinada região, especialmente nos países em desenvolvimento.

O resíduo urbano, popularmente conhecido como lixo, tem sido um dos principais responsáveis pelos impactos causados ao meio ambiente e um dos fatores relacionados a esse problema diz respeito à disposição e tratamento final dos resíduos sólidos urbanos. Entre os vários temas relacionados à questão ambiental que estão em debate atualmente, a disposição e o tratamento dos resíduos sólidos urbanos têm se mostrado como relevantes e expressivos, uma vez que ainda são problemas enfrentados por diversos municípios brasileiros, em termos dos recursos que são desperdiçados, mas principalmente, pela falta de espaços adequados para o recebimento e tratamento correto do lixo que é produzido (JÚNIOR; CORRÊA, 2017).

Neste contexto, o encerramento das áreas de lixões é considerado uma questão no Brasil, inclusive amparado por leis ambientais, as quais discutem e recomendam prazos para isto. O aterro sanitário é uma tecnologia ambientalmente adequada de disposição final dos resíduos, no entanto, antes da disposição final, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) fomenta o emprego de tecnologias de tratamento, como biodigestor, compostagem, central de triagem, entre outros. Além disso, se não bem operado, pode provocar danos maiores ao meio ambiente. Diante disto, novas tecnologias vêm ganhando espaço. Por exemplo, o aproveitamento energético de resíduos são questões ambientais de grande relevância nos dias de hoje, especialmente diante dos desafios relacionados à gestão sustentável de resíduos sólidos e à busca por alternativas mais eficientes e ambientalmente aceitáveis. Essas duas questões estão interligadas, pois o encerramento de lixões

pode ser acompanhado pela implementação de tecnologias que promovem o aproveitamento energético dos resíduos ali depositados.

Sendo assim, o encerramento de lixões é uma medida crucial para mitigar impactos ambientais negativos associados à disposição limitada de resíduos sólidos. Lixões a céu aberto representam riscos significativos para a saúde pública, causam poluição do solo, da água e do ar, além de contribuir para a propagação de doenças e a manipulação estética e ambiental das áreas circunvizinhas. Ao se analisar à questão dos resíduos sólidos sob a ótica da saúde humana, verificam-se efeitos causados pela disposição inadequada dos resíduos sólidos, cujos impactos são: a degradação do solo, comprometimento de lençóis freáticos, poluição do ar e propagação de vetores de importância sanitária nos centros urbanos (JACOBI; BENSEN, 2006).

O aproveitamento energético de resíduos, por sua vez, representa uma abordagem inovadora e sustentável para lidar com a crescente quantidade de resíduos gerados pela sociedade moderna, possibilitando a conversão de resíduos em energia, reduzindo a necessidade de aterros e contribuindo para a diversificação da matriz energética. Na verdade, o aproveitamento energético pode resultar na produção de biogás e combustíveis sintéticos, não somente a eletricidade, contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, é essencial adotar abordagens cuidadosas para evitar a emissão de substâncias atmosféricas durante o processo e garantir a conformidade com padrões ambientais rigorosos.

Sendo assim, a finalidade desse estudo é incentivar o encerramento das atividades da área de lixão do município de Tucuruí-PA a partir do aproveitamento do potencial energético dos resíduos sólidos despejados nesta área, por meio do levantamento da produção anual de resíduos sólidos, de forma a verificar a viabilidade do reaproveitamento energético e seus benefícios socioambientais.

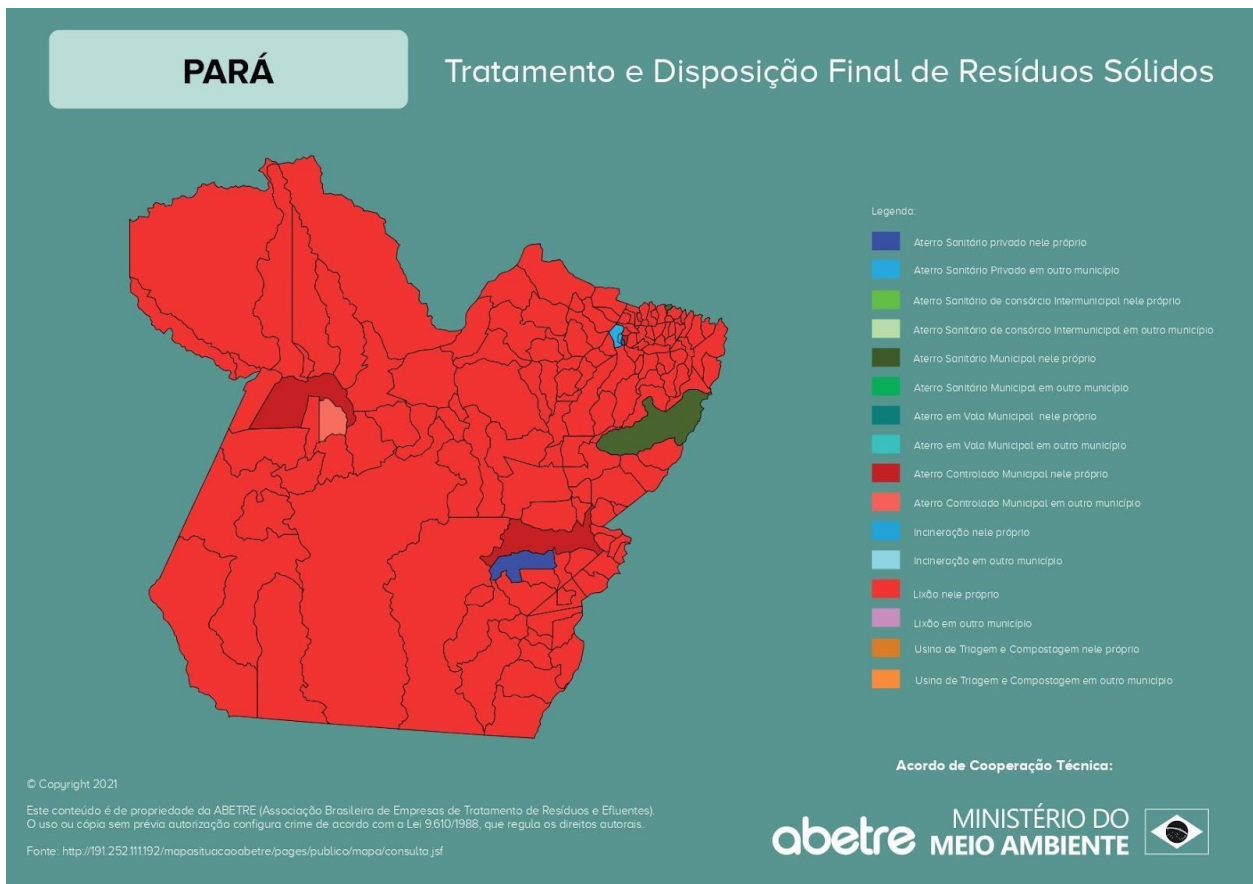
## 1.1 JUSTIFICATIVA

A elevada geração de resíduos sólidos urbanos é uma grande problemática para a esfera política e também para a sociedade como um todo. A disposição final de resíduos sólidos, muitas vezes realizada em lugares inadequados devido à falta de infraestrutura, causa impactos na saúde e ao meio ambiente, além de desperdiçar a valorização energética dos resíduos.

Gonçalves (2020) demonstra que o precário gerenciamento de resíduos é uma realidade no estado do Pará, visto que a maioria dos resíduos coletados nos municípios do estado são

encaminhados para áreas insalubres e causam grandes impactos ambientais. Este ainda diz que dentre as opções de destinação final existentes, as inadequadas: lixão e aterro controlado, e adequadas: aterro sanitário, 95% dos municípios do estado encaminham seus resíduos para áreas de lixões. A Figura 1.1 evidencia essa realidade do estado do Pará.

Figura 1.1 – Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos no Pará.



Fonte: Abetre mapas 2022.

Conforme observado na Figura 1.1, a problemática de disposição final inadequada é mais latente nos municípios do interior do Pará. Essa afirmativa pode ser atribuída a diversos fatores, Beraldo (2020) destaca como desafios para municípios do interior as limitações de infraestrutura, falta de recursos financeiros, baixa conscientização ambiental e desafios na gestão de resíduos. Por exemplo, a Figura 1.2 mostra as Áreas de Lixões a Céu Aberto (ALCA) dos municípios de Tucuruí-PA e Baião-PA. Outro agravante seria a localização dessas ALCA, o município de estudo tem sua disposição final localizada dentro de uma Área de Preservação Ambiental o que vai de encontro aos objetivos de conservação e uso sustentável dos recursos naturais.

Figura 1.2 – ALCA de Baião (1e 2) e Tucuruí (3 e 4).



Fonte: Os autores 2023

O processo de decomposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários produz gases como o metano, um potente gás do efeito estufa. Quando estes gases são liberados na atmosfera, contribuem significativamente para as alterações climáticas. No entanto, esta ameaça ambiental pode ser transformada em uma oportunidade através da captura e utilização do metano como fonte de energia.

O aproveitamento energético dos resíduos e o gerenciamento de resíduos sólidos estão alinhados com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), dos quais podemos destacar o ODS 9 que diz respeito à indústria, inovação e infraestrutura onde o correto gerenciamento e o

aproveitamento energético de resíduos contribuíram para a promoção de infraestruturas sustentáveis e inovações; e o ODS 13 - ação contra a mudança global do clima, onde o aproveitamento dos gases gerados no aterro contribuiria para diminuição de gases do efeito estufa na atmosfera.

Além desses argumentos outros pontos importantes devem ser considerados, como o fato de que o município de Tucuruí não está em consonância com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que está em vigor desde 2010 e em seu artigo 54 colocava como prazo final para o encerramento de lixões o ano de 2014. Posteriormente este artigo foi alterado pelo Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026 de 2020) que altera e complementa o artigo 54 definindo uma nova data para a adequação da disposição final de resíduos (31/12/2020) e, também especifica prazos conforme o tamanho populacional dos municípios. O município de Tucuruí, de acordo com o artigo 54 inciso III da lei nº 14.026, teria até o dia 2 de agosto de 2023 para adequar sua disposição final de resíduos.

Neste sentido, este trabalho aponta para a urgência da adequação da área de disposição final de resíduos sólidos do município de Tucuruí-PA, encerrando suas atividades de maneira sustentável, e a necessidade crítica de explorar estratégias adequadas e sustentáveis para sanar os problemas de gestão de resíduos sólidos municipais, com foco no aproveitamento energético dos resíduos gerados.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Estimular o encerramento das atividades da área de lixão do município de Tucuruí-PA e incentivar o aproveitamento do potencial energético dos resíduos sólidos gerados a partir do encerramento.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar o levantamento da geração anual de resíduos sólidos do lixão de Tucuruí - PA;
- Verificar a viabilidade socioeconômica e ambiental do reaproveitamento de resíduos sólidos para a geração de energia;

- Estimar o potencial energético de resíduos sólidos urbanos através da aplicação de rotas de geração de energia.
- Estimar a quantidade de CO<sub>2</sub>e evitado com a aplicação das rotas de geração de energia.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ACORDOS INTERNACIONAIS: PERSPECTIVA DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A tomada de decisão sobre como reaproveitar os resíduos sólidos urbanos de uma localidade requer uma avaliação desses benefícios para que a melhor opção seja escolhida. Assim, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), podem embasar uma abordagem de avaliação das opções de reaproveitamento. Os ODS, também conhecidos como Objetivos Globais, foram adotados pelos países membros da ONU em 2015 e tem por premissa a orientação das políticas nacionais e atividades de cooperação internacional até 2030, com base no combate à pobreza, proteção do planeta e garantia da paz e prosperidade (PNUD, 2020). Foram estabelecidos 17 ODS com 169 metas a serem alcançadas por meio de ação conjunta que agrega diferentes níveis de governo, organizações, empresas e sociedade, nos âmbitos internacional, nacional e local.

Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável expressos na Agenda 2030 e demonstrados na

Figura 2.1 compreendem: (1) Erradicação da Pobreza; (2) Fome Zero e Agricultura Sustentável; (3) Boa Saúde e Bem-Estar; (4) Educação de Qualidade; (5) Igualdade de Gênero; (6) Água Potável e Saneamento; (7) Energia Limpa e Acessível; (8) Emprego Decente e Crescimento Econômico; (9) Indústria, Inovação e Infraestrutura; (10) Redução das Desigualdades; (11) Cidades

e Comunidades Sustentáveis; (12) Consumo e Produção Responsáveis; (13) Ação Contra a Mudança Global do Clima; (14) Vida na Água; (15) Vida Terrestre; (16) Paz, Justiça e Instituições Eficazes; e (17) Parcerias e Meios de Implementação (PNUD,2020).

Figura 2.1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



Fonte: ONU, 2015. Elaborado por: Neris et. al. 2023.

De acordo com Neris et. al (2023), a partir da gestão integrada e sustentável de resíduos sólidos, mediante a redução, reutilização e reciclagem de resíduos sólidos, a inclusão social e econômica de catadores e catadoras na cadeia de reciclagem e a minimização dos impactos

ambientais negativos que a Política Nacional de Resíduos Sólidos propõe, é possível concluir que esta se relaciona diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, inclusive, indo além, pois também promove melhorias na saúde pública, reduz as desigualdades sociais, promove a preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável.

Assim, após a análise entre o aproveitamento dos resíduos, a produção e o uso do biogás e os ODS, é possível identificar os objetivos que podem ser atribuídos e relacionados, conforme a ONU:

- ODS 1 (Erradicação da pobreza) - Inclusão social e econômica dos catadores de materiais recicláveis;
- ODS 3 (Saúde e Bem-Estar) - Redução dos impactos negativos na saúde decorrentes do descarte inadequado de resíduos;
- ODS 4 (Educação de qualidade) - Inclusão da PNRS como instrumento para o desenvolvimento de programas educativos sobre a importância da gestão adequada de resíduos sólidos;
- ODS 5 (Igualdade de Gênero) - Inclusão das catadoras de materiais recicláveis na cadeia produtiva de reciclagem;
- ODS 6 (Água potável e saneamento) - Gestão integrada de resíduos sólidos para prevenir contaminação do solo e da água e tratamento de águas residuárias;
- ODS 7 (Energia limpa e acessível) - Produção de energia limpa por meio da recuperação energética de resíduos, que pode gerar biogás e outros tipos de energia a partir dos resíduos orgânicos;
- ODS 8 (Trabalho decente e crescimento econômico) - Inclusão social e econômica dos catadores de materiais recicláveis e geração de empregos na cadeia produtiva da reciclagem;
- ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) - Incentivo à economia circular, aproveitamento de resíduos como matéria-prima na indústria, promoção de tecnologias limpas na gestão de resíduos;
- ODS 10 (Redução das Desigualdades) - Inclusão social de catadores de materiais recicláveis, de modo a beneficiar a população marginalizada;
- ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) - Minimização dos impactos ambientais negativos no espaço urbano e promoção da preservação do meio ambiente;

- ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) - Redução de resíduos gerados, adoção de práticas de consumo consciente e a utilização de materiais reciclados e reutilizáveis;
- ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) - Mitigação dos impactos ambientais negativos gerados pelo descarte inadequado de resíduos sólidos e Redução das emissões de gases de efeito estufa;
- ODS 14 (Vida na água) – Redução da poluição dos rios e mares;
- ODS 15 (Vida terrestre) - Conservação e o uso sustentável da biodiversidade terrestre, e proteção da fauna e flora;
- ODS 16 (Paz, justiça e instituições eficazes) - Fortalecimento das cooperativas de catadores;
- ODS 17 (Parcerias e meios de implementação) - Cooperação entre os setores público, privado e a sociedade civil para a implementação de ações sustentáveis.

## 2.2 POLÍTICAS E REGULAMENTAÇÕES

No Brasil há diversas leis que direcionam a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos, objetivando a preservação do meio ambiente e a qualidade de vida. Machado e Oliveira (2019) afirma que um dos progressos significativos na implementação de políticas públicas de resíduos sólidos foi a promulgação da Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), que determina a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Esta legislação foi um diferencial para o gerenciamento e gestão de resíduos sólidos e delega funções e procedimentos individuais e coletivos para alcançar suas principais diretrizes.

No artigo 23º da Constituição Federal de 1988 é colocado as competências da União, dos Estados e dos municípios e no seu inciso IV é colocado que é competência destes proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer uma de suas formas. O artigo 225º trata do compromisso com o meio ambiente e traz em sua introdução o direito, que todos temos, a ter acesso a um meio ambiente ecologicamente equilibrado e a responsabilidade do Poder Público e do coletivo de defender e preservar o meio ambiente.

A Lei 6.938 (BRASIL, 1981), dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e seus instrumentos. A PNMA estabelece os instrumentos e mecanismos para o desenvolvimento sustentável, buscando conciliar o crescimento econômico com a conservação dos recursos naturais e a promoção da qualidade de vida. Dentre os principais objetivos temos a imposição, ao poluidor

e ao predador, da obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos causados ao meio ambiente e a terceiros afetados por suas atividades.

Com a finalidade de desencorajar práticas prejudiciais ao meio ambiente e promover a responsabilidade ambiental a Lei nº 9.605 (BRASIL 1998), Lei de crimes ambientais, foi instituída. Alguns pontos importantes desta lei são a tipificação de conduta, ela apresenta uma série de condutas que são consideradas crimes ambientais, tais como poluição, desmatamento ilegal, pesca predatória, caça ilegal e também prevê as sanções penais e administrativas para quem comete esses crimes ambientais.

A lei 11.445 (BRASIL, 2007), Lei do saneamento básico, foi instituída a fim de dar diretrizes para o saneamento básico e estabelecer normas para a prestação de serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos. Esta legislação também dá diretrizes para a elaboração dos planos municipais de saneamento básico, um ponto importante para a gestão de resíduos sólidos.

Uma outra legislação importante para o meio ambiente e para a qualidade de vida é a Política Nacional sobre Mudança do Clima que foi instituída pela Lei nº 12.187 (BRASIL, 2009) e tem como objetivo principal promover a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a adaptação aos impactos das mudanças climáticas. Essa política reflete o reconhecimento da importância de ações efetivas para lidar com os desafios das mudanças climáticas e promover o desenvolvimento sustentável.

Um avanço legislativo importante, foi o novo Marco legal do saneamento básico, Lei nº 14.026 (BRASIL, 2020) onde traz alterações significativas para que pontos importantes, já colocados pela PNRS sejam atendidos, um deles é o encerramento da disposição final de resíduos sólidos em lixões e a criação do plano de saneamento básico para que se tenha acesso a recursos federais. Essa legislação é parte dos esforços do governo para enfrentar os desafios históricos relacionados à infraestrutura de saneamento no Brasil.

Oliveira e Medeiros (2019) realizaram um estudo sobre a evolução e os desafios do gerenciamento de resíduos na região norte do país e constataram as dificuldades da região norte de estar em consonância com a PNRS, principalmente no que diz respeito à disposição final de resíduos sólidos. Essa realidade é evidenciada também no trabalho de Cristino (2014) onde relata as inúmeras dificuldades da capital Belém em atender os critérios da PNRS, sendo uma problemática antiga da região devido o aterro que recebe os resíduos sólidos chegar em sua

capacidade máxima a alguns anos atrás e este também está com algumas irregularidades no seu projeto prejudicando assim o meio ambiente em que está inserido.

Outra medida para sanar os problemas da capital do estado do Pará, foi a criação do Plano de gerenciamento integrado de resíduos sólidos do município de Belém (Lei nº 8899, de 26 de dezembro de 2011) onde apresenta diretrizes para a gestão e gerenciamento de resíduos e classificação destes, como também cria logística para a coleta dos resíduos do município. O PGIRS é uma tentativa de adequar o município a PNRS, mas ainda não conseguiu sanar o problema de destinação final dos resíduos do município.

### 2.3 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O gerenciamento de resíduos sólidos é um desafio significativo para as sociedades modernas, e a gestão eficiente é crucial para promover a sustentabilidade ambiental. A seguir, temos alguns princípios e desafios associados a esse tema, destacando a importância da gestão sustentável e o papel da gravimetria, além de discutir a questão dos aterros e lixões.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010) traz em seu artigo 3º, inciso X, a definição de gerenciamento de resíduos sólidos que diz que este é o conjunto de medidas realizadas durante a fase de coleta, transporte, transbordo, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos de acordo com os planos municipais de resíduos sólidos. Ainda nessa mesma legislação no Art. 7º, inciso II e no artigo 9º temos os princípios e diretrizes da PNRS que servem de base para uma ordem de prioridade quanto à gestão dos resíduos sólidos: “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (BRASIL, 2010).

Brandão *et al.* (2019) relata que o gerenciamento dos resíduos sólidos nos municípios brasileiros ainda é realizado de forma precária devido à fiscalização deficiente, além disso este também aponta os principais desafios do gerenciamento de RS que são o baixo orçamento, a deficiência de capacitação dos profissionais envolvidos e a ausência de uma política específica para a gestão da limpeza urbana.

Gomes *et al.*, (2021) trás em seu estudo a importância da gravimetria para um eficiente gerenciamento de resíduos sólidos, evitando que resíduos com potencial para aproveitamento sejam

descartados em aterros, prejudicando o uso eficiente desta área e sua vida útil. Para Machado e Oliveira (2019) relata que a gravimetria é de suma importância para um gerenciamento de resíduos de qualidade, pois é importante conhecer a composição do RS e também a quantidade gerada.

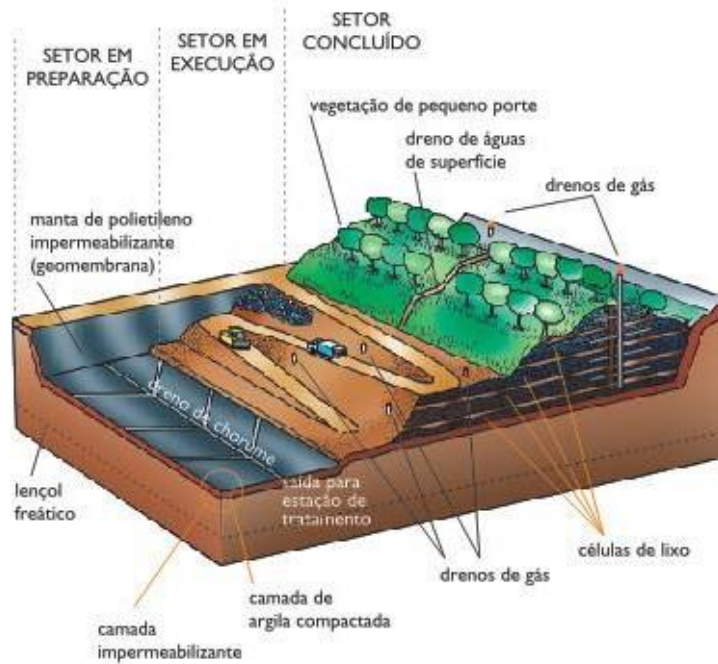
### **2.3.1 Disposição Final de Resíduos Sólidos**

Silva, Tagliaferro e Oliveira (2021) afirmam que o aterro sanitário é um método de disposição final que visa evitar danos à saúde pública e minimizar os impactos ambientais. Desfrutando de serviços de engenharia, confina os resíduos na menor área possível, cobrindo com uma camada de terra sendo esta técnica considerada eficiente e segura. Sendo assim, é a maneira adequada de disposição final de rejeitos (materiais sem possibilidade de aproveitamento). A Figura 2.2 mostra a estrutura de um aterro sanitário.

Segundo a NBR 8419 (ABNT,1992), aterro sanitário é:

“Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário” (ABNT, 1992).

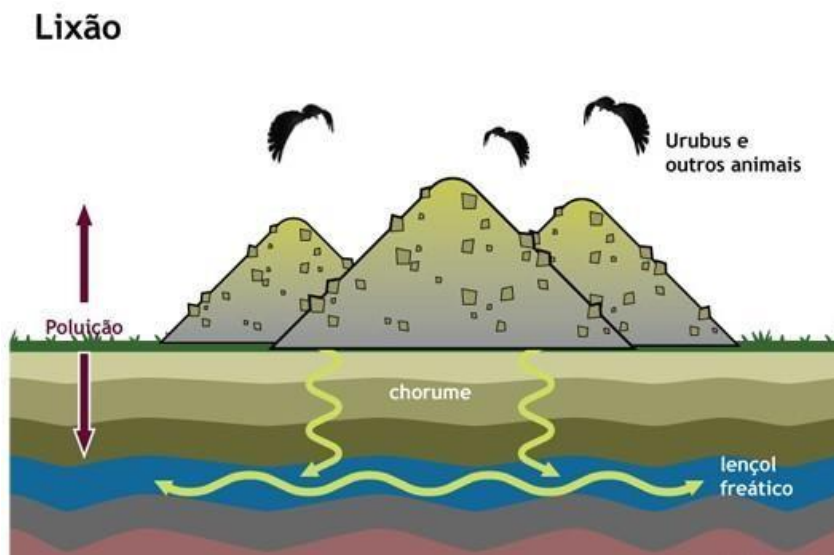
Figura 2.2 - Aterro Sanitário



Fonte: Diprotec GEO (2018).

Silva, Tagliaferro e Oliveira (2021) em seu estudo também trata sobre os lixões, colocando-os como forma inadequada de dispor os resíduos e apontando estes como geradores de impactos socioambientais, atrativo de vetores de doenças e é uma instalação que compromete a segurança da saúde pública e do meio ambiente. A Figura 2.3 caracteriza a estrutura de um lixão a céu aberto.

Figura 2.3 – Estrutura de um lixão à céu aberto.



Fonte: Ecotres 2019.

Assim a gestão eficaz de resíduos sólidos requer abordagens integradas, considerando a prevenção, a reciclagem e a disposição final responsável, sendo o aterro sanitário a disposição final adequada para os rejeitos. A gravimetria desempenha um papel crucial na implementação de estratégias eficientes, enquanto a gestão sustentável é essencial para garantir um futuro ambientalmente saudável.

## 2.4 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A geração de energia a partir de resíduos sólidos é uma abordagem sustentável que contribui para a redução do impacto ambiental dos resíduos, ao mesmo tempo em que aproveita recursos disponíveis. Vamos analisar algumas tecnologias disponíveis para o aproveitamento energético de resíduos sólidos e os benefícios associados a essas práticas.

Ferreira (2019) diz que a incineração dos resíduos tem um desenvolvimento de energia parecido com as térmicas convencionais e sua eficiência está atrelada à capacidade de conversão de calor em eletricidade e ao poder calorífico dos resíduos. Este também ressalta a importância de um correto dimensionamento da incineração e do sistema de limpeza.

Costa (2010) aborda o conceito de digestão anaeróbia como um processo onde os microrganismos decompõem a matéria orgânica na ausência ou em níveis muito baixos de oxigênio. Este processo apresenta duas fases diferentes: a mecânica onde ocorre a separação dos recicláveis e a fase biológica onde a fração orgânica é estabilizada e o material resultante desse processo pode ser útil em diversos reaproveitamentos como, produção de fertilizante para o solo, aumento da recuperação de recicláveis e produção de calor/energia elétrica.

Outro importante método de aproveitamento energético que tem ganhado destaque nos últimos anos é a gaseificação. Lopes, Okamura e Yamamoto (2015) abordam a gaseificação como uma tecnologia que tem sido aplicada na obtenção de produtos e combustíveis. O crescimento desse modelo na indústria se justifica pelo produto gerado neste processo o gás de síntese (syngas) que é um gás de alta qualidade caracterizado pelo seu potencial energético e características não poluentes e também o fato de que diversos materiais podem ser empregados como insumo no processo de gaseificação.

Araújo (2016) aponta o processo de gaseificação como um processo flexível por conseguir usar variados tipos de reagentes, inclusive a biomassa proveniente de aterros sanitários. Sendo

utilizado em aterro sanitário a gaseificação pode converter o problema ambiental em fonte de energia e crédito de carbono.

Nascimento (2019) relata que o aproveitamento do biogás, que é um gás oriundo da decomposição anaeróbia dos resíduos, é benéfico devido a geração de energia sustentável e contribuição para diminuição de gases do efeito estufa como o metano e o dióxido de carbono. Este também faz outras considerações sobre o biogás como fonte de energia e diz que é um mercado vantajoso, pois contribui para melhoria na operação dos aterros sanitários, gera receita com crédito de carbono e com a venda da eletricidade adquirida no processo.

## 2.5 ESTUDOS DE CASO SEMELHANTES

Figueiredo (2011), realizou um estudo de caso, onde foi avaliado o potencial de geração de biogás do Aterro Essencis – CTR Caieiras, na cidade de Caieiras – SP e, também a viabilidade técnica e econômica da implantação de um projeto de geração de energia elétrica através do biogás gerado no mesmo, do qual a metodologia utilizada para quantificar o potencial do aterro aproximou-se do real captado, demonstrando que o CTR – Caieiras possuía um potencial de geração de energia elétrica igual a 1.530 MWh/ano.

Mazioli (2019), elaborou uma análise de sistemas de geração de energia usando resíduos sólidos urbanos, através de três estudos de casos, onde primeiro caso faz a análise técnica de um sistema de geração de energia usando biogás de aterro sanitário com motores a Diesel e uma turbina a gás, estudo que é realizado para quatro cidades mineiras que devido aos aportes populacionais e conseqüentemente geração de metano, onde as potências geradas seguem a ordem crescente de Betim, Uberaba, Uberlândia e Contagem. O segundo caso trata de um estudo do desempenho de microturbinas a gás utilizando biogás oriundo de resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica sendo a análise de sensibilidade realizada através da variação da razão de pressão do compressor e da temperatura na entrada da turbina para diferentes valores de eficiência do compressor, da turbina e do regenerado. E o terceiro caso é uma análise técnica de um sistema de geração de energia através do uso de resíduos sólidos urbanos e caldeira para as cidades de Belo Horizonte e Betim, sendo os resultados de Belo Horizonte os mais satisfatórios devido ao seu maior índice populacional conseguindo gerar 9,6 MWeI para o ciclo Rankine com superaquecimento. Assim, os cenários estudados pela autora, comprovaram a viabilidade em termos de eficiência energética e a sustentabilidade da utilização de resíduos sólidos urbanos na geração de energia.

Maciel (2009), em sua análise, tinha como objetivo avaliar o potencial de geração de biogás e produção de energia, a partir da implantação de uma célula com 36.659 toneladas de resíduos sólidos urbanos e uma usina piloto com capacidade de 20kW, na qual os resultados encontrados permitiram concluir que devido as características dos resíduos e do clima, a decomposição dos RSU ocorreu intensamente e de maneira mais acelerada que o previsto na literatura, e no que se refere a geração de energia, a eficiência obtida no gerador se encontra dentro do previsto na literatura, além disso, a análise financeira demonstrou que o projeto com venda de energia elétrica é viável desde que possua restrições de tarifação e considerem-se os certificados de emissões reduzidas (CERs) do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

Maciel, Jucá e Neto (2011), realizaram um estudo de um projeto cujo objetivo foi a avaliação do potencial de geração de biogás e a análise da produção de energia, a partir do desenvolvimento e implantação de uma célula experimental com 36.659 t de resíduos sólidos urbanos e uma usina piloto com capacidade de gerar 20 kW no Aterro da Muribeca/PE. Onde os resultados encontrados permitiram concluir que em função das características dos resíduos e do clima local a decomposição dos RSU ocorreu de forma mais intensa e acelerada que o previsto na literatura internacional e a eficiência global obtida no gerador está dentro da faixa de valores reportados na literatura. Os autores perceberam que a análise simplificada de viabilidade do empreendimento mostrou que o projeto com venda de energia elétrica é viável com restrições de tarifação, entretanto quando os Certificados de Emissões Reduzidas (CERs), a viabilidade se torna altamente positiva.

Santo Filho (2013), realizou um estudo que visava estimar o potencial de energia elétrica do biogás gerado por resíduos sólidos urbanos no Brasil, o qual foi aplicado para todos os 5.565 municípios do país, utilizando o método IPCC 2000, para estimar a geração de biogás, e dados do IBGE 1970 a 2010 para representar o crescimento populacional e estimar a quantidade de resíduos gerados nos anos estudados. No estudo, foram analisados os cenários de referência, otimista e pessimista, de maneira a representar as tendências na gestão de resíduos no país, onde o resultado mostrou que para o ano de 2013 o potencial elétrico seria de 938 MW e para o ano de 2020 igual a 1.602 MW.

## 2.6 DESAFIOS DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Os países em desenvolvimento enfrentam desafios crescentes na gestão de resíduos sólidos e na sua utilização inadequada, causando riscos à sociedade e ao meio ambiente. As altas frações

de resíduos orgânicos nos resíduos sólidos pode levar à recuperação de energia através da aplicação de processamento adequado, mas, por outro lado, pode criar problemas de poluição se for eliminado sem adotar quaisquer medidas de controle. As opções mais comuns de tecnologias de tratamento são: tratamento mecânico, compostagem, biodigestores, entre outros. E, quanto a finalidade do tratamento e/ou disposição final, podemos citar: aproveitamento mássico (reciclagem) e energético.

De acordo com a literatura, o aproveitamento energético de resíduos sólidos apresenta diversos desafios e limitações, que podem variar de acordo com a região, a escala do projeto e as condições locais.

As limitações relacionadas à financiamento, se referem ao investimento inicial elevado, visto que a implementação de tecnologias avançadas para o aproveitamento energético de resíduos muitas vezes requer investimentos significativos, o que pode ser um desafio, especialmente para projetos em países ou regiões com recursos financeiros limitados.

Enquanto os desafios tecnológicos, são ocasionados pela variedade de resíduos, visto que há uma composição variada dos resíduos sólidos e diferentes tipos de resíduos requerem abordagens específicas de tratamento, além de que a idade do resíduo interfere. Pesquisas mostram que resíduos novos (recentemente gerados) geram mais energia que os envelhecidos (resíduos aterrados). E, também, a conversão de resíduos em energia podem gerar desafios em termos de eficiência e desempenho, afetando a viabilidade econômica do projeto.

Há, ainda, as limitações relacionados à aceitação pública, causadas por preocupações ambientais, especialmente em relação às emissões resultantes da queima ou processamento de resíduos, pois a poluição do ar e a gestão adequada de subprodutos são aspectos críticos. Projetos de aproveitamento energético de resíduos muitas vezes enfrentam resistência local, conhecida como NIMBY (Not In My Backyard), devido a preocupações com impactos ambientais, estéticos e de saúde.

Da mesma maneira, os desafios regulatórios, surgem pela falta de um quadro regulatório claro ou pela complexidade das regulamentações ambientais que dificultam o desenvolvimento e a implementação de projetos de aproveitamento energético. Além do mais, a logística também torna-se um desafio, pois a eficiência na coleta de resíduos é fundamental para garantir a disponibilidade adequada de matéria-prima para os projetos de aproveitamento energético, logo sistemas

inadequados de coleta podem prejudicar a viabilidade do projeto. E, também, a viabilidade econômica a longo prazo é crucial para o sucesso dos projetos. Os custos operacionais, incluindo manutenção e gestão de resíduos, podem afetar a rentabilidade.

Outrossim, os desafios relacionados à educação e conscientização, ocorrem pela falta de conscientização pública, sobre a importância do aproveitamento energético de resíduos, que pode resultar em resistência da comunidade local e dificultar a implementação de projetos.

A viabilidade técnica da instalação de WTE é comprovada e estabelecida em poucos lugares na Índia. No entanto, existem alguns problemas, como elevados custos de capital, manutenção e operação, mão de obra qualificada, segregação de fontes, mudanças nas condições climáticas ao longo do ano, que precisam ser examinados (DHAR; KUMAR; KUMAR, 2017).

Para Santo (2013), existem diversas barreiras no que concerne ao aproveitamento de gás de aterro, sendo elas tecnológicas (que estão relacionadas a falta de disponibilidade, a nível nacional, de tecnologias apropriadas para o aproveitamento energético e também de mão de obra especializada para a implementação desses projetos, haja vista que no país não existe um mercado estabelecido, com serviços e equipamentos específicos para o aproveitamento energético em grande escala, como no caso de regiões metropolitanas), econômicas (visto a necessidade de importação de grande parte dos equipamentos para o aproveitamento energético, o que resulta em uma série de custos adicionais que acabam elevando o valor final, como também os custos com transporte, impostos, taxas alfandegárias e possível retenção por parte da Receita Federal) e sociais (em que para a sociedade, o aproveitamento pode gerar novas oportunidades de trabalho, o que gera um aumento da renda local e na arrecadação de impostos, no entanto, a contratação de profissionais, principalmente catadores, formaria uma barreira, pois não estão acostumado com o mercado formal).

Para Figueiredo (2011), há também barreiras políticas associadas à conversão energética do biogás, que estão ligadas à falta de leis que impulsionam o mercado de fontes renováveis, bem como subsídios de financiamento e tarifas diferenciadas para esse tipo de energia e, também à falta de prioridade no que se refere ao saneamento básico no país, haja vista que o índice de tratamento de resíduos sólidos urbanos ainda é baixo, onde grande parte da população não tem acesso à coleta de lixo e, em muitos casos o resíduo coletado não tem a destinação final correta, logo o biogás, que

seria gerado por meio de uma coleta e descarte correto, e a venda da energia elétrica gerada, contribuiriam para aumentar a viabilidade dos projetos.

Assim, para superar esses desafios, é essencial uma abordagem integrada que envolva governos, setor privado e a comunidade em geral. Estratégias eficazes de comunicação, políticas claras e parcerias colaborativas podem ajudar a enfrentar esses desafios de maneira mais eficiente.

## 2.7 SUSTENTABILIDADE E VIABILIDADE

O aproveitamento energético de resíduos sólidos pode ser avaliado em termos de sustentabilidade considerando os aspectos econômicos, sociais e ambientais. Além disso, o encerramento dos lixões e a capacitação dos catadores, incluindo a criação de cooperativas, são elementos importantes nessa avaliação.

Conforme a literatura, no que se refere à viabilidade econômica, pode-se citar a redução de custos de disposição, onde o aproveitamento energético de resíduos pode contribuir para a redução dos custos associados à destinação inadequada em aterros ou lixões, sendo especialmente relevante quando comparado aos custos de manutenção e gestão de grandes áreas destinadas ao descarte de resíduos. Também, há a geração de receitas, visto que a produção de energia a partir dos resíduos pode gerar receitas adicionais, seja pela venda de eletricidade à rede ou pela obtenção de créditos de carbono e, essas receitas podem contribuir para a viabilidade econômica do projeto. E, ainda, há a geração de empregos e renda, por meio da criação de cooperativas e do envolvimento de catadores no processo de seleção de resíduos para reciclagem antes do aproveitamento energético podendo gerar empregos e renda, beneficiando a comunidade local.

Em relação à sustentabilidade social, a ampla literatura afirma que há inclusão de catadores, por meio da capacitação de catadores e sua integração em cooperativas, que não apenas proporcionam uma fonte de renda estável, mas também promovem a inclusão social e melhoram as condições de trabalho desses profissionais. Há, ainda, melhoria das condições de vida, pois ao fechar lixões e criar sistemas mais eficientes de gestão de resíduos, há uma melhoria nas condições de vida da comunidade, com redução da poluição, dos riscos à saúde e das condições insalubres associadas aos lixões.

Além disso, no que diz respeito à sustentabilidade ambiental, a literatura confirma que há a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), haja vista que, o aproveitamento energético

de resíduos, especialmente por meio de processos como a gaseificação ou biodigestão anaeróbica, pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, quando comparado ao simples descarte em aterros. Onde também, o fechamento de lixões é crucial para a sustentabilidade ambiental, de maneira a reduzir a contaminação do solo e da água, minimizar a proliferação de doenças, e impedir a emissão de poluentes atmosféricos provenientes da decomposição dos resíduos. Além de, também, promover a economia circular, onde há a integração de catadores e a promoção da reciclagem como parte do processo contribuem para a economia circular, reduzindo a demanda por novos materiais e minimizando os impactos ambientais associados à extração de recursos.

Sabe-se que usinas de biogás a partir de resíduos orgânicos contribuem com um valor mais saudável para a comunidade agrícola devido à redução de odores, patógenos e ervas daninhas do esterco junto com a geração de fertilizante melhorado facilmente absorvido pela planta. O biogás não só produz energia, mas também desempenhou um papel vital na gestão de resíduos, na limpeza ambiental e no fornecimento de um serviço contínuo de combustível no futuro (VIJAY, 1996; WEILAND, 2010; GOSENS et. al., 2012).

Holder (2010), explica que na Alemanha, onde esse tipo de conversão energética é amplamente difundido, com mais de 4.000 plantas em funcionamento, aproximadamente 1.400MWe, tal resultado se deve à Lei de Energia Renováveis de 2000, que tem o objetivo de aumentar a participação de fontes renováveis na matriz energética alemã.

Castaldi (2022) afirma que o uso de WTE em conjunto com sistemas de reciclagem/compostagem de separação na fonte pode atingir praticamente o patamar de zero resíduos em aterros sanitários e, até 90% em peso da massa enviada para uma instalação WTE pode ser reduzida se os minerais nas cinzas forem recuperados para a construção de estradas. Também enfatiza os benefícios climáticos da WTE são ainda mais impressionantes considerando o papel do metano como um poluente climático de curta duração, onde novos dados mostram que o metano emitido por aterros e outras fontes é ainda mais prejudicial do que se pensava anteriormente. Além disso, instalações típicas de WTE (ou seja, capacidade de processamento de aproximadamente 2.500 toneladas por dia) criam, aproximadamente, 600 empregos de construção, em tempo integral, e quase 50 cargos permanentes, em tempo integral. Por fim, em relação à preservação do solo, o uso do WTE ocupa um espaço significativamente menor em relação apenas a aterro. Em média, as instalações WTE requerem, aproximadamente, 0,007 acre/t de RSU processado, resultando em

uma planta típica que requer cerca de 15 a 20 acres ao longo de toda a sua vida útil. Por outro lado, se a mesma quantidade de resíduos processados em uma WTE fosse enviada para aterros sanitários, por 30 anos, seria necessária uma massa de terra de quase 34% do Central Park (ou seja, 280 acres) com uma altura de cerca de 25 pés.

No que concerne à saúde, ela não é afetada negativamente pelo WTE. Um relatório do Conselho Nacional de Pesquisa dos EUA, do ano 2000, afirmou que poluentes como material particulado, chumbo, mercúrio e dioxinas e furanos de instalações WTE bem administradas devem contribuir pouco para as concentrações ambientais ou para os riscos à saúde (National Research Council, 2000). E, as avaliações dos impactos do WTE devem considerar as emissões diretas de poluentes, bem como os benefícios potenciais de diferentes estratégias de gerenciamento de resíduos na comunidade, sugerindo que os benefícios para a saúde, de instalações WTE modernas e gerenciadas adequadamente, podem superar os riscos à saúde (Morgan et. al., 2019).

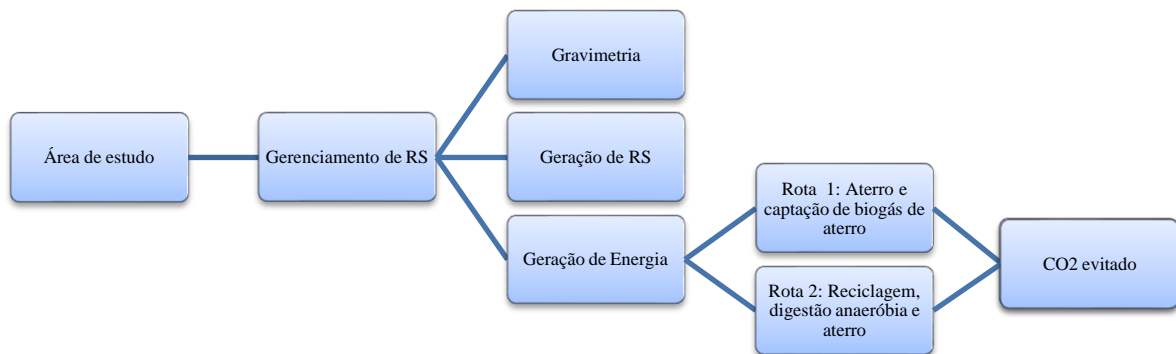
Cristino (2014), em seu estudo, afirma que as contribuições sociais da implantação e operação de um projeto de gás de aterro seriam relativos ao incremento na oferta e oportunidades de empregos, tanto durante o período de instalação do sistema, quanto para a operação e monitoramento do mesmo. Além disso, as contribuições ambientais seriam proporcionadas via combustão a destruição de metano (que seria emitida diretamente à atmosfera na ausência da atividade de projeto), a atividade de projeto no âmbito do MDL promoverá real redução de emissão de GEE e, também, promoverá diminuição da poluição do ar local, eliminando, por exemplo, o forte odor normalmente causado pela emissão direta gás de aterro na região do entorno de um aterro.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo consiste na estimativa de geração de energia a partir de resíduos urbanos (RS) gerados no município de Tucuruí – Pará, estimulando o encerramento sustentável da área de lixão à céu aberto (ALCA), a partir da determinação quantitativa dos RS de municípios de até 250 mil habitantes e de dois tipos de rotas de geração de energia propostas por Padilha e Amarante Mesquita (2022).

Inicialmente foram estudadas a viabilidade de implantação de seis rotas de geração de energia para RS, baseadas em aterros sanitários, reciclagem, gás de aterro, digestão anaeróbia e incineração, tecnologias de tratamento e disposição final comumente empregados no Brasil e mais consolidadas na literatura. A Figura 3.1 ilustra as etapas da presente metodologia. Inicialmente, foi realizada a caracterização da área de estudo, neste caso, a ALCA do município de Tucuruí, na região Norte do Brasil. Em seguida, foi estudado o gerenciamento dos RS local, com detalhamento na composição gravimétrica e a geração total de RS local, com a ênfase especial para a geração *per capita* do município. A partir disto, foram detalhadas duas rotas de geração de energia com RS, sendo estas adaptadas para as condições locais, ou seja, baseando-se na estimativa de geração de RS do município escolhido. Finalmente, foi estimado o quantitativo de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) evitado e o número de automóveis correspondente a essa geração.

Figura 3.1 – Metodologia proposta

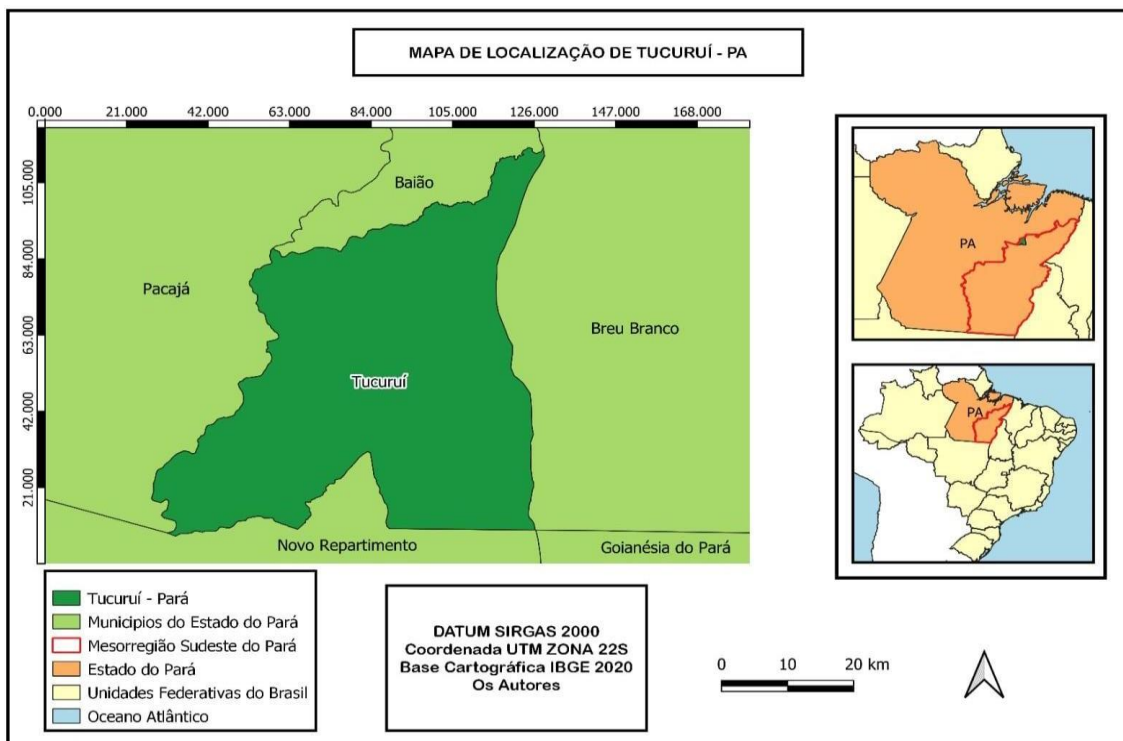


Fonte: Autores, 2023.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Tucuruí, mesorregião sudeste do estado do Pará, norte de Brasil, que se limita ao norte com Baião, a Leste com Breu Branco, ao sul com Novo Repartimento e a oeste com Pacajá, todos pertencentes a microrregião de Tucuruí (Figura 3.2). O município possui uma população estimada em 91.306 habitantes, distribuídos em uma área de 2.084,289 km<sup>2</sup> (IBGE, 2022). Além disso, o clima do município é o tropical úmido, segundo a classificação de Köppen-Geiger, e o período mais chuvoso do município compreende os meses de janeiro a abril, enquanto o mais seco vai de junho a outubro, com temperaturas variando de 22 °C a 34 °C (INMET, 2018).

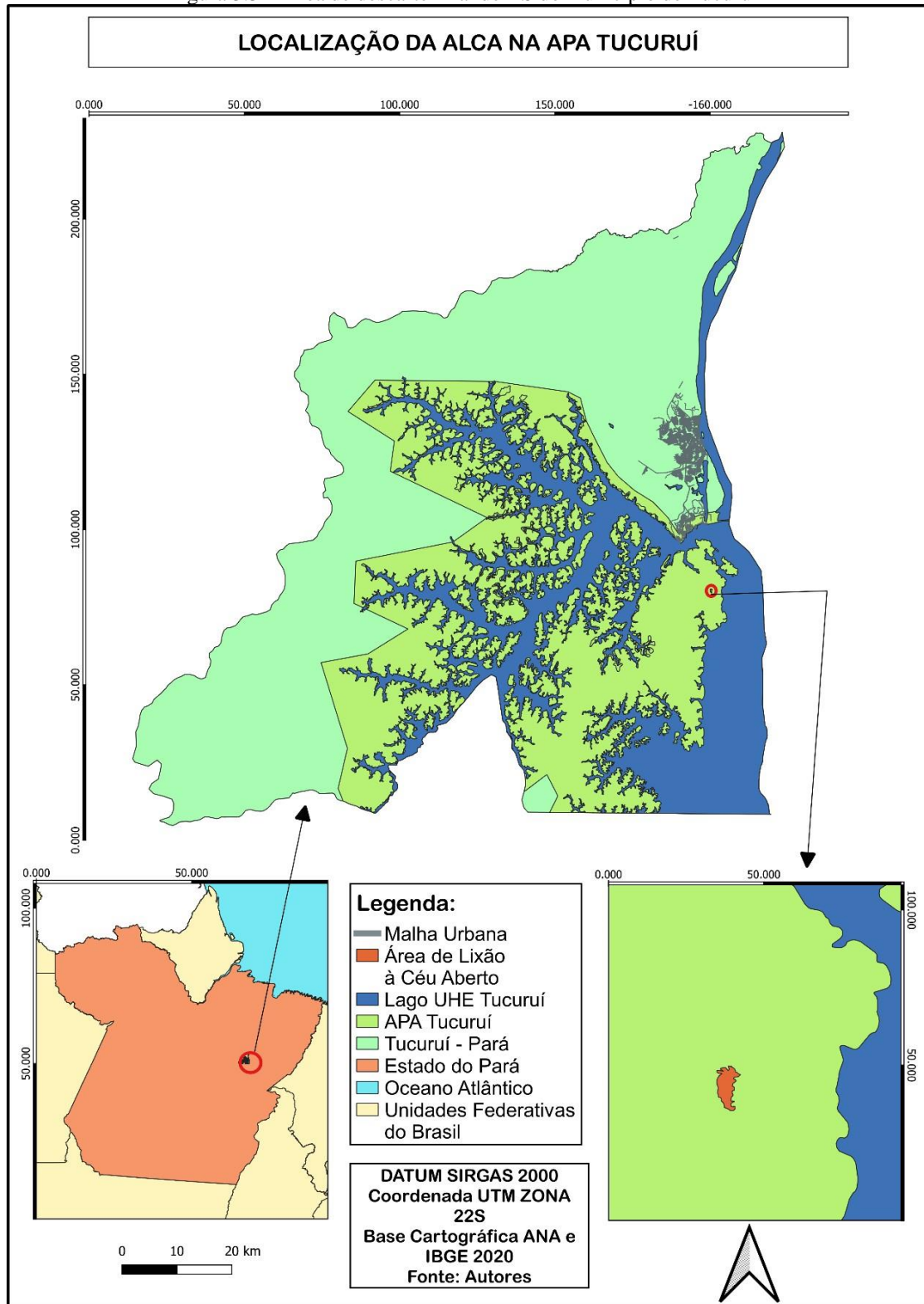
Figura 3.2 – Mapa de localização do município de Tucuruí



Fonte: Autores, 2023.

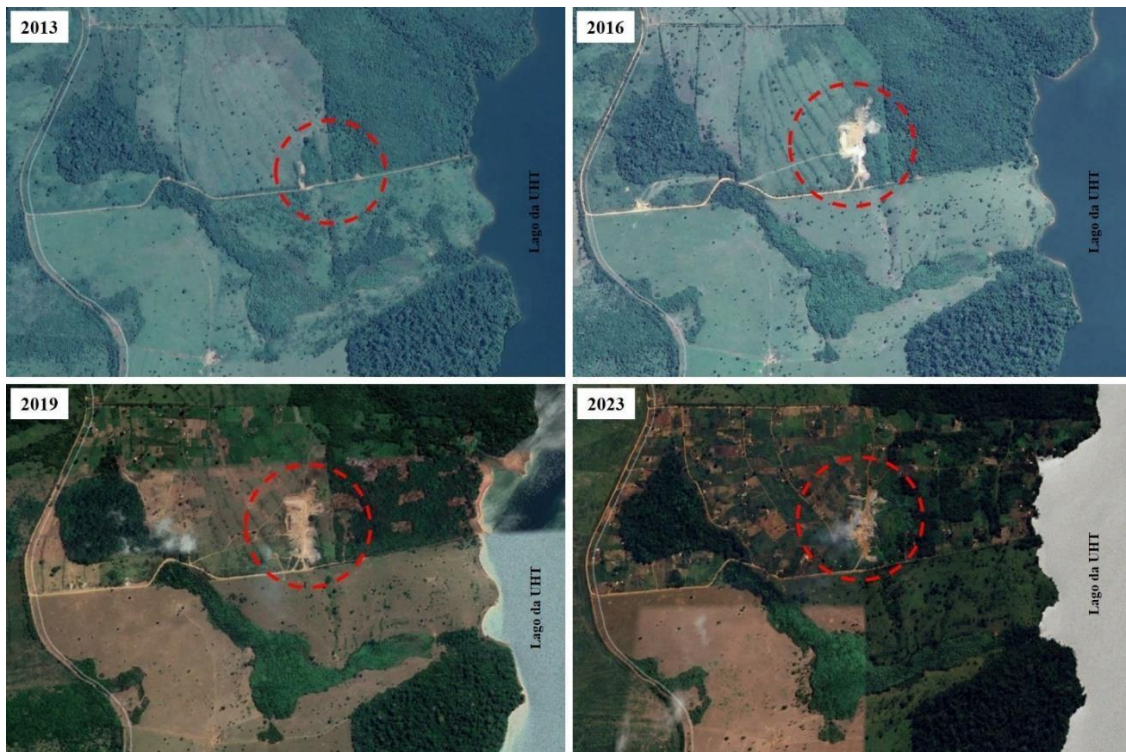
A pesquisa foi aplicada na área de descarte final de RS do município de Tucuruí. A administração municipal já utilizou outras áreas para fazer a disposição final dos RS. Atualmente, os resíduos coletados são dispostos em uma área de lixão a céu aberto (ALCA) de, aproximadamente, 42.680 m<sup>2</sup>, localizada na BR 422, dentro da Área de Preservação Ambiental (APA) Lago de Tucuruí, que faz parte da unidade de conservação que compõem essa região, conforme apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Área de descarte final de RS do município de Tucuruí



A ALCA cresceu substancialmente na última década, conforme apresentado na Figura 3.4. Em 2013, a prefeitura iniciou as atividades de disposição de RSU na área. Três anos depois (2016), a áreas mais que dobrou e vem crescendo consideravelmente sem previsão de encerramento. Além disso, vêm atraindo moradias simples de catadores, como observado no ano de 2023. Isso se deve pela dinâmica populacional local, clima, poder aquisitivo e atitudes insustentáveis da população. Outro agravante é o fato de o município não tarifar os serviços de saneamento básico, em particular, pelo gerenciamento de RS, influenciando no quantitativo de RS gerados e em diversos impactos socioambientais.

Figura 3.4 – Crescimento da Área do Lixão de Tucuruí - PA (2013-2023)



Fonte: Google Earth Pro (2023).

## 3.2 GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

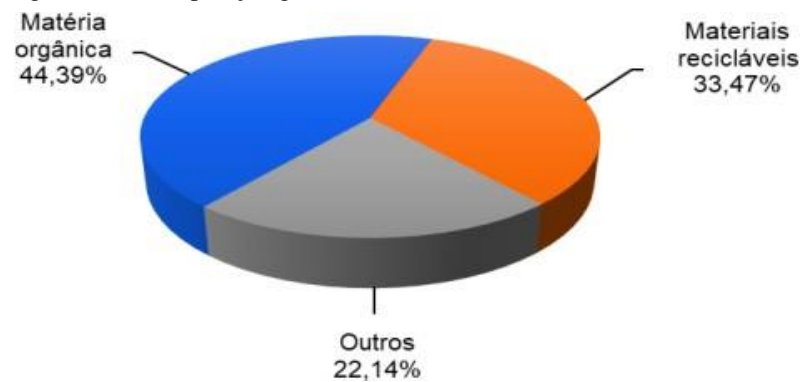
### 3.2.1 Composição gravimétrica dos resíduos sólidos de Tucuruí

A composição gravimétrica (CG) de um local é necessária para obter o perfil de consumo e geração de RS; auxiliando a tomada de decisões sobre a gestão dos RS (TAKEDA et al., 2022). A

partir dela, é possível definir o percentual dos componentes de uma amostra em relação seu peso total, além de compreender o comportamento da geração de RS de qualquer aglomerado populacional (SOARES, 2011).

Para a aplicação da metodologia proposta, foi necessário estudar a geração de RS de Tucuruí e elaborar a CG do município. No entanto, devido a morosidade da administração municipal em conceder autorização de entrada na ALCA, foram considerados os resultados do trabalho de Silva et al. (2022). No estudo, os autores realizaram a CG no lixão de Tucuruí, no ano de 2018, adotando a metodologia do quarteamento, de acordo com a NBR 10007 (ABNT, 2004), largamente utilizada e consolidada na literatura (MENEZES et al., 2017; TAGLIAFERRO; VIANA, 2019). Além disso, a publicação é recente e demonstra o perfil atual de geração de RS municipal, indispensável para as etapas seguintes dessa investigação. Os resultados da CG são apresentados na Figura 3.5 e na Tabela 3.1.

Figura 3.5 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos de Tucuruí-PA.



Fonte: Silva et. al., 2022.

Tabela 3.1 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos de Tucuruí-PA.

<b>Categoria</b>	<b>Percentual</b>
Plástico	18,39%
Papel / Papelão	6,96%
Metal	2,97%
Vidro	5,15%
Matéria Orgânica	44,39%
Outros	22,14%
<b>Total</b>	<b>100%</b>

Fonte: Silva et. al. (2022).

### 3.2.2 Estimativa de geração de resíduos sólidos de Tucuuruí

Para planejar as ações do gerenciamento de RS em Tucuuruí, a administração municipal se baseia no Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (PMGIRS) elaborado no ano de 2013 pela empresa Clean, o qual relata a CG e estimativa de geração per capita de RS daquele ano (Tucuuruí, 2013). Porém, é objetivo deste trabalho apresentar dados atuais e que representem um cenário mais realista, visto que já somam duas décadas desde a elaboração do estudo realizado pela Clean.

Deste modo, para estimar a quantidade de RS gerados no município, foi utilizado o valor da massa coletada per capita em relação à população urbana de Tucuuruí de 0,99 kg/hab.dia (Quilogramas por habitantes por dia), disponibilizado recentemente pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022). Para estimar o valor total de RS gerados em Tucuuruí atualmente utilizou-se a Equação (3.1), sendo:  $RS_{Tuc}$  é a estimativa de RS [kg/dia],  $M_{rs}$  é a massa coletada de RS per capita em Tucuuruí [kg/hab.dia] e  $Pop_{Tuc}$  é a população de Tucuuruí do ano de 2022 (IBGE, 2022) [hab.].

$$RS_{Tuc} = (M_{rs} \times Pop_{Tuc}) \quad (3.1)$$

Além disso, com a CG e o total de RS municipal estimado, a massa correspondente a cada tipo de resíduo discriminado na CG (SILVA et al., 2022) foi determinada a partir do produto mostrado na Equação (3.2), sendo  $RSE_{Tuc}$  a massa de RS específica para a porcentagem determinada na CG [kg/dia] e  $\%_{RS}$  é a porcentagem de cada RS da CG [%].

$$RSE_{Tuc} = (\%_{RS} \times RS_{Tuc}) \quad (3.2)$$

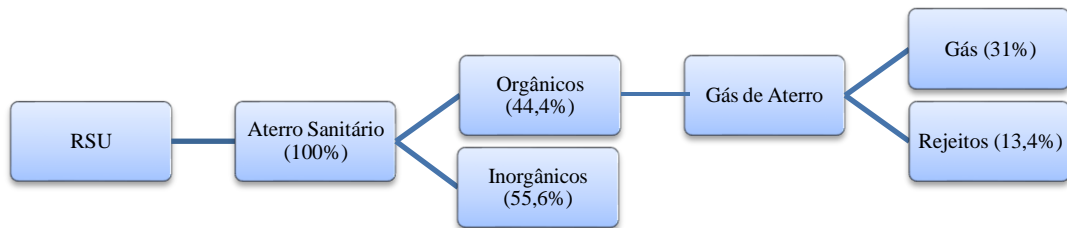
### 3.3 GERAÇÃO DE ENERGIA

No presente trabalho, foram consideradas as seguintes tecnologias de tratamento e disposição final dos resíduos para fins de aproveitamento energético, a saber: aterro sanitário com aproveitamento energético, que inclui captação de gás de aterro e a rota de reciclagem, biodigestão de aterro sanitário, para comparação de potência gerada e a análise de adequação ao município de Tucuuruí. Devido às consequências ambientais quando comparadas a outras rotas, a incineração foi descartada neste estudo.

### 3.3.1 Rota 1 – Aterro sanitário com captação de biogás de aterro

Nesta rota (Figura 3.6), 100% dos RSU é coletado sem separação e apenas a parte orgânica (44,4%) é aproveitada para geração de energia. Desse total, foi utilizado 31% da massa de RSU como gás para a geração de energia. O restante da matéria inorgânica remanescente (55,6%) é composto por materiais recicláveis e inertes e não se enquadram para o aproveitamento energético.

Figura 3.6 - Rota 1: Aterro com gás de aterro

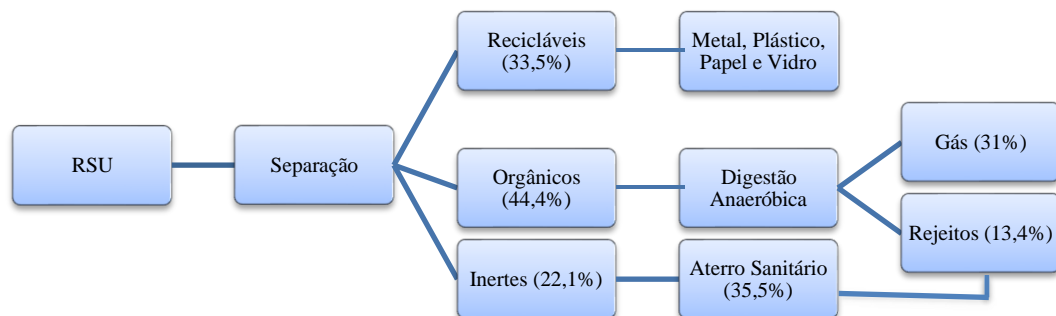


Fonte: Autores, 2023.

### 3.3.2 Rota 2 – Reciclagem e aterro sanitário com digestão anaeróbia

Na rota 2 (Figura 3.7), os resíduos foram separados em orgânicos e inorgânicos, sendo cada um deles enviados para seu aproveitamento e disposição final. Os orgânicos (44,4%) devem ser enviados para a digestão anaeróbia (utilizado como gás 31% da massa de RS), os recicláveis (33,5%) aproveitados e os materiais que não tinham potencial para ser reciclados (13,4% de rejeitos e 22,1% de materiais inertes, totalizando 35,5% dos RSU) foram encaminhados para disposição final em aterro sanitário.

Figura 3.7 - Rota 2: Reciclagem, digestão anaeróbica e aterro sanitário.



Fonte: Autores, 2023.

### 3.3.3 Apresentação do modelo

Para estimar a quantidade de energia gerada em cada rota, o processo de digestão anaeróbica foi tratado como não acumulativo, diferenciando-se do processo de gás de aterro. A Equação (3.3) apresenta a estimativa de Digestão Anaeróbica (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017).

$$AD = 0,28 * m_o * P_{(CH_4)} * PCI_{(CH_4)} * \Delta t * CP * \eta_e \quad (3.3)$$

Onde: 0,28 conversão de kWh/MJ;  $m_o$  = massa orgânica presente no RSU (t/h);  $P_{(CH_4)}$  = razão de geração de metano a partir da fração orgânica do RSU no Brasil (Nm<sup>3</sup>/t) (170) (EPE, 2018);  $PCI_{(CH_4)}$  = 35,53\*106 J/m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> (PIN et al., 2018);  $\Delta t$ : horas anuais de operação da planta em h/ano (8,000 h);  $\eta_e$  = eficiência elétrica (0,33%) (PIN et al., 2018).

Por sua vez, para dimensionar a rota de geração de gás de aterro, foi utilizado o método da cinética de primeira ordem, modelo IPCC de decaimento de primeira ordem (FOD), o qual é utilizado para estimar a quantidade de gás metano em aterros sanitários a partir da AMS III.G (IPCC, 2006), como pode ser observado na Equação (3.4) que projeta a quantidade de metano formada durante o ano. Com esta estimativa, a potência e a energia elétrica podem ser calculadas pela Equações (3.5) e (3.6), respectivamente (PIN et al., 2018).

$$Q_{CH_4,y} = (\varphi * (1 - f) * GWP_{CH_4} * (1 - OX) * \frac{16}{12} * F * DOC_f * MCF * \sum_i \sum_j W_{j,x} * DOC_j * e^{-k_j * (y-x)} * (1 - e^{-k_j})) \quad (3.4)$$

$$P_{LFG} = Q_{CH_4,y} * \eta_e * Ec * P_{cCH_4} * \left( \frac{1}{31.536.000} * \frac{1}{1000} \right) \quad (3.5)$$

$$E_{LFG} = P * \Delta t * CP \quad (3.6)$$

Onde:  $Q_{CH_4,y}$  = emissões de metano durante um ano y a partir da disposição de RSU durante o período que vai do início da atividade de projeto até o final do ano y (tCH<sub>4</sub>/ano);  $\varphi$  = fator de correção para corrigir incertezas do modelo; f = fração de metano capturada e queimada, como combustível;  $GWP_{CH_4}$  = potencial de aquecimento global do metano; OX = fator oxidação; 16/12 = conversão de C para CH<sub>4</sub>; F = fração de CH<sub>4</sub> no gás;  $DOC_f$  = fração de carbono orgânico degradável que pode se decompor;  $DOC_j$  = fração de carbono orgânico degradável (em peso) no

tipo de resíduo  $j$ ;  $MCF$  = fator de correção de metano;  $W_{j,x}$  = quantidade de tipo de resíduo orgânico  $j$  disposto no aterro sanitário por ano  $x$  (toneladas/ano);  $k_j$  = taxa de decomposição para o tipo de corrente de resíduo  $j$ ;  $j$  = tipo de resíduo distinto entre as categorias de resíduos  $x$  ano;  $x$  = corridas a partir do primeiro ano;  $y$  = ano para o qual as são calculadas as emissões de metano;  $PLFG$ =potência disponível para cada ano (kW);  $P_{cCH_4}$ =poder calorífico do metano;  $E_c$ =eficiência de coleta de coletores de gás;  $ELFG$  = energia produzida em kWh/ano; 31.536.000: número de segundos em 1 ano (s/ano); 1/1000 J/s para fator de conversão kW. No processo, foram utilizados os seguintes valores:

- $\phi = 0,9$ ;
- $f = 0$ ;
- $GWPC_{CH_4} = 21$ ;
- $OX = 0,0$ ;
- $F = 0,5$ ;
- $DOC_f = 0,5$ ;
- $DOC_j = 0,12$ ;
- $k_j = 0,4$  (IPCC, 2006);
- $MCF = 0,71$ ;
- $P_{cCH_4} = 35,53,106 \text{ J/m}^3\text{CH}_4$ ;
- $X = 1$  e  $y = \text{ano } 5$  (PIN et al., 2018), para
- $E_c = 35\%$  (JOHARI et al., 2012).

### 3.3.4 Conversão de Potência Elétrica em Energia Elétrica

Para converter a potência elétrica gerada, através das rotas, em energia elétrica por hora, utiliza-se a equação 3.7 na rota 1 e equação 3.8 na rota 2, em que é realizada a conversão de Watt (W) ou Joule/s (J/s) para kWh.

$$EE_{.R1} = P * 3600 \quad (3.7)$$

$$EE_{.R2} = AD * 3600 \quad (3.8)$$

Onde:  $AD$  = digestão anaeróbica (J/s); 3600 = conversão J/s (W) para kWh e  $P$  = potência.

## 3.4 ESTIMATIVA DE CO<sub>2</sub> EVITADO

A partir da geração de CH<sub>4</sub> estimada no tópico anterior, foi utilizado o GWP para estimar a quantidade de CO<sub>2</sub>e que deixará de ser emitido para a atmosfera, conforme observado na Equação (3.9). Além disso, foi conduzida uma análise comparativa do impacto da equivalência de redução de emissão de CO<sub>2</sub> produzido pela circulação de automóveis. Para isso, adotou-se o fator de

conversão médio de 400  $gCO_2/kWh$  (CAPUTO; SARTI, 2015). O Instituto de Pesquisa Econômicas Aplicadas (HENRIQUE; CARVALHO, 2011) e o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2014) relataram a emissão média de  $gCO_2/km$  e a distância média de condução dos automóveis Brasileiros na Tabela 3.2. A partir desses valores, as emissões evitadas de  $CO_2$  no processo de geração de energia com a aplicação das duas rotas consideradas neste trabalho e o número de automóveis circulantes equivalentes à mesma quantidade em emissão foram estimadas.

$$CO_2e = \text{Gás (x)} * GWP \quad (3.9)$$

Onde: Gás (x) = quantidade de um gás qualquer do efeito estufa (ton) e GWP = potencial de aquecimento global do gás.

Tabela 3.2 - Emissão de  $CO_2$  e distância média de condução de automóveis Brasileiros.

Modalidade	Emissões quilométricas ( $gCO_2/km$ )*	Distância média de condução ( $km/ano$ )**
Carro	190	12.000
Motocicleta	70	10.500

Fonte: HENRIQUE e CARVALHO (2011)\* e BRASIL (2014)\*\*.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Por meio da CG elaborada por Silva et al. (2022), foi possível estimar os dados referentes à quantidade de resíduos gerados no município por meio da equação (3.1) e equação (3.2). Na Tabela 4.1 é possível observar os valores de RSE (massa de resíduo específica) gerada por dia, mês e ano.

Tabela 4.1- Total de RS e de SER de Tucuruí-PA para o ano de 2022.

<b>Categoria</b>	<b>Percentual</b>	<b>RSTuc [kg/dia]</b>	<b>RSETuc [kg/dia]</b>	<b>RSETuc [kg/mês]</b>	<b>RSETuc [kg/ano]</b>
Plástico	18,39%	90.392,94	16.623,26	498.697,85	6.034.497,08
Papel / Papelo	6,96%		6.291,35	188.740,46	2.296.342,25
Metal	2,97%		2.684,67	80.540,11	979.904,67
Vidro	5,15%		4.655,24	139.657,09	1.699.161,29
Matéria Orgânica	44,39%		40.125,43	1.203.762,78	14.645.780,51
Outros	22,14%		20.012,99	600.389,91	7.304.743,87
<b>Total</b>	<b>100%</b>		-	<b>90.392,94</b>	<b>2.711.78,2</b>

Fonte: Autores, 2023.

A geração de resíduos sólidos em Tucuruí mostra um panorama que, embora tenha reduzido nos últimos anos (SNIS, 2021), demonstra descaso por parte da administração de pequenos e médios municípios. Por exemplo, a Tabela 4.2 relata dados sobre a disposição final dos resíduos na Região Norte. Mais da metade dos RS gerados ainda continua sendo disposto inadequadamente. Entende-se por disposição adequada o envio de resíduos para aterros sanitários e por disposição inadequada o encaminhamento dos resíduos para lixões e aterros controlados.

Tabela 4.2 - Tipo de disposição final de RS na região Norte.

<b>Região</b>	<b>Disposição Adequada</b>	<b>Disposição Inadequada</b>
Norte	t/ano 1.816.174	3.242.805
	% 35,9	64,1

Fonte: Panorama de RS ABRELPE 2022.

Municípios com população semelhante a Tucuruí, inclusive a poucos quilômetros dentro do Pará, também ainda experimentam a disposição final de seus resíduos em áreas de lixões. A Tabela 4.3 faz um comparativo entre três municípios do estado do Pará, incluindo Tucuruí. De forma bem semelhante, fica evidente que municípios do interior, pequenos e médios, continuam dispondo seus

RS de forma inadequada. Infelizmente, isto vai de encontro com algumas diretrizes estabelecidas no Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026 de 2020), entre elas o Art. 54 que estabelece que “A disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos deverá ser implantada até 31 de dezembro de 2020”.

Tabela 4.3 - Gerenciamento de RS em municípios do Pará

<b>Município</b>	<b>Moju</b>	<b>Redenção</b>	<b>Tucuruí</b>
Nº de habitantes*	83.039	85 597	91306
Tipo de unidade de tratamento de RS*	Lixão	Lixão	Lixão
População total atendida por coleta de resíduos*	48.000	80.052	110.979
Massa per capita coletada (kg/hab/dia)*	0,17	1,74	1,89
Tipo de Licença Ambiental*	Outro tipo	Prévia	Não possui
Impermeabilização da base*	Não informado	Não	Não
Frequência de cobertura de resíduos*	Diária	Não é realizada	Quinzenal
Aproveitamento dos gases*	Não informado	Não	Não informado
Monitoramento Ambiental*	Não informado	Sim	Não informado
Cobrança*	Não é realizada cobrança	Taxa específica no boleto do IPTU	Não é realizada cobrança
Consumo de energia elétrica (kWh)**	34.669.670	124.958.039	76.846.219

Fonte: SNIS (2021) \* e FAPESPA (2019)\*\*.

Na verdade, o art. 54 da 14.026/2020 também determina prazos a serem cumpridos para os municípios, que tem até a data citada para a adequação, tenham elaborado o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos. Sendo assim, o prazo para a adequação da destinação final muda de acordo com o número de habitantes dos municípios. O inciso III deste artigo se aplica aos municípios da Tabela 4.3 já que estabelece o prazo de até 2 de agosto de 2023, para Municípios com população entre 50.000 (cinquenta mil) e 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010.

Outro ponto importante a ser observado é que os municípios de Moju e Tucuruí ainda não cobram pelos serviços de saneamento básico, o que também fere o novo marco do saneamento. O Conteudista 2021 diz que “De forma que a cobrança por serviços de Resíduos Sólidos Urbanos deverá ser instituída pelo titular do serviço até julho de 2021 conforme definido no §2º, art. 35 da Lei nº 14.026/2020. Ou seja, no prazo de 12 meses de vigência da Lei, ou configurará renúncia de receita”.

## 4.2 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA

A Tabela 4.4 apresenta as estimativas dos potenciais teóricas para geração de energia elétrica das Rotas 1 e 2. A potência elétrica se refere a energia elétrica produzida em uma hora e a potência elétrica disponível seria a energia gerada subtraída das perdas significativas ocasionadas por cargas parasitas, ou seja, em processos envolvidos no funcionamento do sistema.

Tabela 4.4 - Potência elétrica e potência elétrica disponível por Rota.

<b>Rota</b>	<b>Potência Elétrica (kW)</b>	<b>Potência Elétrica Disponível (kW)</b>	<b>Energia Elétrica (kWh/mês)</b>
1	452,74	407,46	1.466.856
2	931,17	838,06	3.017.016

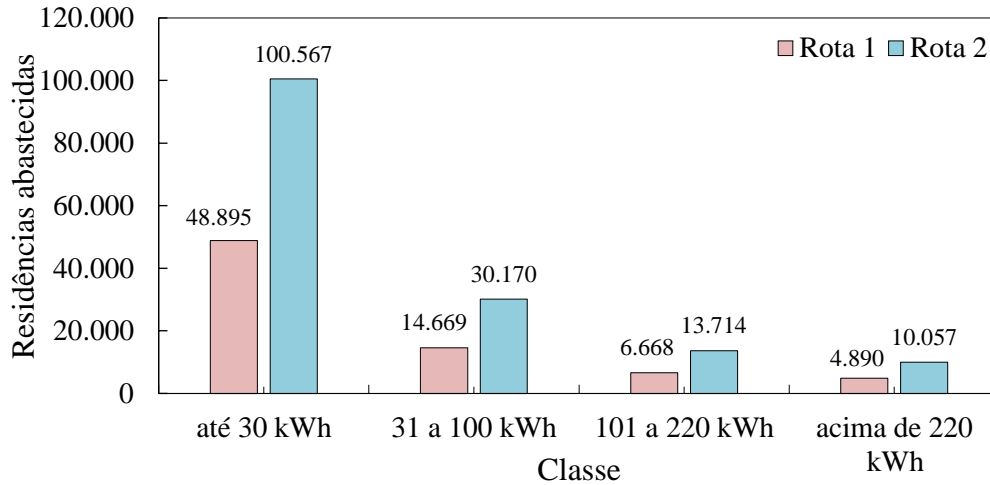
Fonte: Autores, 2023.

Quando a potência elétrica é convertida em energia elétrica, observa-se um valor equivalente significativo, com um total de 1.466.856 kWh/mês para a Rota 1, através da Equação (3.7) e 3.017.016 kWh/mês para a Rota 2, por meio da Equação (3.8). É possível notar que a Rota 2, que compreende a digestão anaeróbica, apresentou melhor desempenho, cerca de 105,5% de produção de energia a mais quando comparada com a Rota 1, que adotou o gás de aterro. Ressalta-se que a digestão anaeróbica opera apenas com a fração orgânica (44,4% dos RSU) e a estimativa do potencial de produção de biometano considera apenas resultados de ensaio padrão, não avaliando as condições operacionais que podem maximizar essa produção.

Além disso, de acordo com Victorino (2017), os potenciais benefícios da digestão anaeróbica derivam especialmente da redução ou desvio da matéria orgânica biodegradável que seria depositada no aterro, recuperação de materiais sob forma de biogás e biofertilizante e da redução das emissões de GEE, que são grandes “vilões” na estabilidade do sistema climático global.

Embora Tucuruí seja 15ª economia do estado do Pará (IBGE, 2021), 41,6% da população tinha uma renda per capita de meio salário-mínimo no ano de 2010 (IBGE, 2010), ou seja, quase a metade da população poderia ser considerada de baixa renda. Se a administração municipal optasse e direcionasse a energia gerada (kWh/mês) das Rotas 1 e 2 para abastecer as residências de famílias enquadradas na classe baixa renda da concessionária local (EQUATORIAL, 2023), poderia atender, por mês, uma parcela considerável de residências por faixa de consumo, como observado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Estimativa de residências abastecidas, por mês, com energia gerada das Rotas 1 e 2



Fonte: Adaptado de Equatorial Energia (2023).

Uma outra comparação interessante é com os dados do Radar de Indicadores das Regiões de Integração elaborado pela Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Estado do Pará (FAPESPA, 2022). No documento observa-se que o consumo de energia elétrica no Pará, nos municípios da região de integração (RI) do lago de Tucuruí e em cada um dos sete municípios no ano de 2021 (Tabela 4.5). Naquele ano, o consumo de energia elétrica em Tucuruí foi de 81.923.113 kWh. Com a construção de um aterro sanitário e o reaproveitamento energético de RS por meio da rota 2 seria possível reduzir, aproximadamente, 44,2% da energia advinda da concessionária de energia local, considerando um total anual produzido de 36.204.192 kWh/ano estimado no presente trabalho

Tabela 4.5 - Consumo de Energia Elétrica Total (kWh) e Redução no consumo através da rota 2.

<b>Estado ou Município</b>	<b>Consumo de Energia Elétrica (kWh/ano)</b>	<b>Redução no consumo de energia (%)</b>
Pará	9.452.487.696	0,4
RI Lago de Tucuruí	239.606.703	15,1
Breu Branco	28.191.546	128,4
Goianésia do Pará	19.476.237	185,9
Itupiranga	28.824.579	125,6
Jacundá	37.390.002	96,8
Nova Ipixuna	9.795.208	369,6
Novo Repartimento	34.006.017	106,5
Tucuruí	81.923.113	44,2

Fonte: FAPESPA e Equatorial Energia (2022).

Para reforçar, é apresentado a redução no consumo de energia no Estado e nos outros municípios, estimado pelo mesmo valor, na Tabela 4.5, e percebe-se que a energia produzida através da Rota 2, produzida somente pelo município de Tucuruí, abasteceria por completo os municípios de Breu Branco, Goianésia do Pará, Itupiranga, Nova Ipixuna e Novo Repartimento.

Na verdade, o município poderia ingressar no Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) – Lei Nº 14.300/2022, no qual a energia ativa é injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída na rede da distribuidora local, cedida a título de empréstimo gratuito e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa ou contabilizada como crédito de energia de unidades consumidoras participantes do sistema.

Além disso, se a RI do lago de Tucuruí integrassem um consórcio municipal de disposição de resíduos, de acordo com a Lei Nº 11.107, de 6 de abril De 2005, com um dos sete municípios recebendo os RS dos demais em um aterro sanitário, a energia gerada poderia ser notável. Nesta perspectiva, a energia gerada pela Rota 2 poderia ser dividida entre os integrantes e utilizada de forma a atender os interesses da população local.

O Decreto 6.017/07 (art. 2º), define o consórcio público como uma pessoa jurídica formada exclusivamente por entes da Federação (Lei 11.107/05), para estabelecer relações de cooperação federativa, inclusive à realização de objetivos de interesse comum, constituída como associação pública, com personalidade jurídica de direito público e natureza autárquica, ou como pessoa jurídica de direito privado sem fins econômicos (BRASIL, 2007a).

No trabalho de Siqueira, Nogueira e Barros (2022), os consórcios municipais são soluções muito válidas e benéficas. Em seu estudo, os autores observaram um descompasso entre a lei e a realidade fática do município de Redenção - PA, de modo que o melhor cenário para o município cumprir as metas da PNRS é a consorciação, já que, assim, poderá criar um ambiente de reaproveitamento dos RSU, promovendo sustentabilidade ambiental e poderá dividir os custos de instalação de um aterro com outros municípios.

De acordo com Cristino (2014), no que se refere a gestão de resíduos sólidos urbanos, os consórcios públicos intermunicipais têm sido vistos como uma alternativa, tanto para os municípios que apresentam escassez de locais para os aterros sanitários, em função da conturbação e constante mudança de uso e ocupação do solo urbano, como também para o ganho de escala, otimização dos recursos, bem como a minimização dos impactos ambientais em municípios de pequeno e médio porte.

Por exemplo, no município de Marituba – PA, há uma Central de Processamento e Tratamento de Resíduos Urbanos (CPTR – Marituba), com uma área de 1.110.000 m<sup>2</sup>, que atende os municípios de Belém, Ananindeua e Marituba, desde junho de 2015, sendo o único aterro sanitário do Pará autorizado e licenciado pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente (Semas). O aterro de Marituba recebe aproximadamente 480 mil toneladas de resíduos por ano. São cerca de 40 mil por mês, algo em torno de 1.300 por dia. O aterro foi instalado para que o lixão do Aurá fosse desativado, em Ananindeua, local que recebia todo o lixo da região metropolitana sem qualquer tratamento, poluindo diretamente mananciais, o ar, além de gerar problemas econômicos e de saúde à população do entorno. No entanto, o aterro está em processo judicial para seu encerramento, pois o Ministério Público do Pará (MPPA) e moradores apontam falhas que resultaram em impactos à população e ao meio ambiente, tanto por parte da empresa responsável na implantação e funcionamento do aterro como pelas prefeituras ao não dar à devida atenção ao destino do lixo produzido pelos moradores e não cumprir metas estabelecidas.

Apesar disso, autoridades, especialistas e a população não têm dúvidas que os lixões ainda existentes no Pará devem encerrar suas atividades o quanto antes, visto os impactos ambientais, e que os aterros sanitários são a melhor solução para destinar rejeitos que não podem ser aproveitados.

Outrossim, com a criação do aterro, seria vantajoso para que houvesse a retirada dos catadores dos arredores do lixão, sendo, inclusive, indicado a formação de cooperativas (Lei 14.260/21 - Lei de Incentivo à Reciclagem), que estabelece incentivos fiscais e benefícios a projetos que estimulem a cadeia produtiva de reciclagem e fomentem o uso de matérias-primas e insumos de materiais recicláveis e reciclados, como prevê a PNRS.

A criação de cooperativas possibilita aos catadores a valorização e a profissionalização de seu trabalho, além de proporcionar maior poder de venda, visto que dessa forma é criado um canal de venda direta à indústria, incentivando a eliminação da figura de um intermediário (Sousa (2022)). Um grupo de catadores pode faturar melhor em conjunto do que individualmente.

Além disso, sabe-se que a coleta seletiva é a base da reciclagem e da economia circular (Stahel, 2016). A economia circular destaca-se como um modelo inovador, já que transforma bens que estão no final de sua vida útil em recursos para outros processos, fechando ciclos em ecossistemas industriais e minimizando resíduos, onde pressupõe-se a separação doméstica apropriada e uma infraestrutura pública adequada para o descarte dos recicláveis. Assim, com a

coleta seletiva e uma cooperativa, seria mais fácil a separação dos resíduos para a sua utilização na geração de energia por meio da Rota 2.

#### 4.3 ESTIMATIVA DE GÁS CARBÔNICO EVITADO

A Tabela 4.6 relata a quantidade de Gás Metano (CH<sub>4</sub>) e a quantidade de Gás Carbônico evitado (CO<sub>2</sub>e) a partir da geração de CH<sub>4</sub> estimada nas rotas por meio da Equação (3.4). A conversão foi realizada admitindo-se o valor de CH<sub>4</sub> igual a 21 (*Global Warming Potential - GWP*), ou seja, o potencial de aquecimento global do gás metano é 21 vezes maior do que o potencial do gás carbônico (IPAM Amazônia, 2023).

Tabela 4.6 – Estimativa de produção de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>e.

Unidade	Quantidade de CH <sub>4</sub>	Quantidade de CO <sub>2</sub> e
ton/ano	19.110,89	401.328,69
ton/hora	2,18	45,78

Fonte: Autores, 2023.

A rigor, outros benefícios como a redução de GEE, em particular o CO<sub>2</sub>, deve ser incluído na mesma análise. Portanto, foi estimado o número de carros ou motocicletas circulantes no Brasil equivalentes a redução de gCO<sub>2</sub>/ano evitado a partir da produção de energia da Rota 2, conforme relatado na Tabela 4.7. Assim, percebe-se que para a produção de energia advinda das duas rotas, haveria uma redução de CO<sub>2</sub>/ano equivalentes a 6.352 carros e 19.703 motocicletas.

Tabela 4.7– Número de automóveis circulantes no Brasil equivalentes a redução de gCO<sub>2</sub>/ano inerente a produção de energia da Rota 2.

Automóvel	gCO <sub>2</sub> /ano por automóvel	Produção de energia [kWh/ano]	Conversão [gCO <sub>2</sub> /ano]	Equivalência [Automóveis/ano]
Carro	2.280.000	36.204.192	14.481.676.800	6.352
Motocicleta	735.000			19.703

Fonte: Autores, 2023.

Dessa forma, com o gerenciamento adequado dos resíduos e do seu aproveitamento para geração de energia, seria possível atender aos ODS, com a implantação da Rota 2, que consiste em aterro sanitário, produção de energia através da digestão anaeróbica e reciclagem, pois haveria a inclusão social e econômica dos catadores de materiais recicláveis, redução dos impactos negativos na saúde decorrentes do descarte inadequado de resíduos, prevenção da contaminação do solo e da água, produção de energia limpa e incentivo à economia circular, havendo assim a minimização

dos impactos ambientais negativos no espaço urbano e promoção da preservação do meio ambiente e mitigação dos impactos ambientais negativos gerados pelo descarte inadequado de resíduos sólidos e redução das emissões de gases de efeito estufa.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo incentivar o encerramento das atividades da ALCA do município de Tucuruí-PA a partir do aproveitamento do potencial energético dos resíduos sólidos que seriam dispostos na área. Analisando a CG do município e por meio de rotas tecnológicas, que tem como objetivo a captação de gás de aterro, pode-se obter a quantidade de resíduos gerados e assim estimar o potencial energético obtido em cada rota, evidenciando posteriormente que a rota 2 possui melhor beneficiamento de geração de energia para o município.

Após analisar o levantamento da produção anual de resíduos sólidos do lixão de Tucuruí - PA, que resultou em um valor expressivo de quase 33 milhões de kg/dia, fica evidente a urgência de implementar estratégias mais eficientes e sustentáveis para lidar com a crescente produção de resíduos. Adequando a disposição final para que o aproveitamento do biogás seja efetivado. Outra solução seria a implementação de medidas junto a comunidade que visem à redução, reutilização e reciclagem desses materiais.

O município de Tucuruí apresenta um potencial considerável de aproveitamento de biogás ou biometano para geração de energia elétrica. O projeto para captação do gás de aterro é viável e vem sendo aos poucos instalados nas grandes cidades, além de ser benéfico para redução dos GEE essa captação promove alterações positivas no cenário atual de mudanças climáticas, explora fontes alternativas de energia renováveis e ainda tem o retorno econômico ao abastecer residências com energia elétrica limpa, derivada do processo de aproveitamento dos resíduos sólidos.

O potencial energético quando convertido gera 1.466.856 kWh/mês para a Rota 1 e 3.017.016 kWh/mês para a Rota 2, sendo a última mais interessante para o município de Tucuruí devido seu maior potencial energético e, também, por abranger reciclagem e aterro sanitário. Este potencial energético se aproveitado poderia atender um número considerável de residências no município. E, caso houvesse um consórcio que abrangesse os municípios da RI do Lago de Tucuruí esse valor poderia ser ainda maior e beneficiária, através da divisão, os municípios integrantes.

No que diz respeito ao CO<sub>2</sub> evitado, a partir da rota tecnológica de captação de gás de aterro, a redução do CO<sub>2</sub> através da produção de energia seria equivalente a 6.352 carros e 19.703 motocicletas. Dessa maneira, não seria gerado apenas uma energia mais sustentável, mas também haveria a redução da emissão de 401.328,69 toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Outro ponto importante a sugestão para a organização dos catadores em cooperativas, proporcionando maior dignidade aos mesmos, além da aplicação de soluções intermunicipais, focando na criação de um consórcio de resíduos para uma maior geração de energia, onde todos os municípios que participassem desse consórcio seriam beneficiados com a energia gerada.

Como trabalhos futuros, sugere-se a estimativa do aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos nos demais municípios do estado e, também, um estudo com a simulação da criação de consórcios de aterros sanitários entre os municípios para posterior aproveitamento energético.

## 6 REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 8419/1992: **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10007- **Amostragem de resíduos:** procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

ANDRADE, E. R. R. **Geossintéticos Na Construção De Aterros Sanitários.** Disponível em: <<https://diprotecgeo.com.br/blog/geossinteticos-na-construcao-de-aterros-sanitarios/>>. Acesso em: 29 nov. 2023.

ARAÚJO, R. M. S. **Estudo comparativo de processos de gaseificação de resíduos sólidos urbanos no Brasil.** 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BRANDÃO, C. R. P. et al. **COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DESCARTADOS IRREGULARMENTE NO BAIRRO DOS RODOVIÁRIOS, PAULO AFONSO - BA.** Semioses, v. 13, n. 1, p. 60–76, 2019.

BRASIL, **Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981 - Política Nacional de Meio Ambiente.** Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l6938.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm)>. Acesso em: 26 dez. 2023.

BRASIL, **Lei nº 9605, de 12 de fevereiro de 1998 – Lei de Crimes Ambientais.** L9605. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9605.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm)>. Acesso em: 26 dez. 2023.

BRASIL, **Lei nº 12.187 de 29 de dezembro de 2009 – Política Nacional sobre Mudança do Clima.** L12187. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm)>. Acesso em: 26 dez. 2023.

BRASIL, **Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).** Brasília, 2 de agosto de 2010.

BRASIL. 2020. **Lei nº 14.026.** Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm#art7](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm#art7)

**BRASIL, Lei Nº 14.300 de 06 de janeiro de 2022** - Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências.

**BELÉM, Lei nº 8899, de 26 de dezembro de 2011** - Plano de gerenciamento integrado de resíduos sólidos do município de Belém. Disponível em:<http://leismunicipa.is/ajmie>.> Acesso em: 29/11/2023.

**BERALDO, L. Quase metade dos municípios ainda despeja resíduos em lixões.** Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2020-08/quase-metade-dos-municipios-ainda-despeja-residuos-em-lixoes>>. Acesso em: 23 dez. 2023.

**CASTALDI, M. J. A Verdade Científica Sobre A Recuperação Energética De Resíduos.** Departamento de Engenharia Química do City College of New York City, University of New York, 2022. Disponível em:< <https://abren.org.br/2022/09/05/a-verdade-cientifica-sobre-a-recuperacao-energetica-de-residuos/>>. Acesso em 10 de julho. de 2023.

**COSTA, J. P. F. Tratamento mecânico e biológico de resíduos sólidos urbanos: avaliação do seu potencial para a recuperação de materiais recicláveis.** 2010. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa.

**CRISTINO, M. G. G. et al. Diretrizes e propostas apresentadas por entidades públicas para atendimento à Lei 12.305/10 da Política Nacional de Resíduos Sólidos, região metropolitana de Belém.** 2014.

**DADA, O.; MBOHWA, C. Energy from waste: a possible way of meeting goal 7 of the sustainable development goals.** Materials Today: Proceedings, v. 5, n. 4, p. 10577-10584, 2018.

**DHAR, H.; KUMAR, S.; KUMAR, R.** A review on organic waste to energy systems in India. **Bioresource technology**, v. 245, p. 1229-1237, 2017.

**Diprotec GEO. Geossintéticos Na Construção De Aterros Sanitários.** 2018. Disponível em: <<http://diprotecgeo.com.br/blog/geossinteticos-na-construcao-de-aterros-sanitarios/>>. Acesso em: 28 nov. 2023.

**ECOTRES. Entenda a diferença entre Aterro Sanitário e Lixão.** Disponível em: <<https://www.ecotres.com.br/entenda-a-diferenca-entre-aterro-sanitario-e-lixao/>>. Acesso em: 29 nov. 2023.

**FAPESPA – FUNDAÇÃO AMAZÔNICA DE E AMPARO A ESTUDOS E E PESQUISAS. Radar de Indicadores das Regiões de Integração – 2022.** Disponível em: <https://fapespa.pa.gov.br/sistemas/radar2022/tabelas/7-lago-de-tucurui/tabela-49-consumo-de-energia-eletrica-total-e-consumidores-de-energia-eletrica-por-tipo-2021-ri-lago-de-tucurui.htm>.> Acesso em: 15 de out. de 2023.

FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, J. M. et al. Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities. **Waste Management**, v. 67, p. 360–374, 2017.

FERREIRA, N. A. **ANÁLISE DE PROCESSOS DE CAPTAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO: Digestão Anaeróbia e Incineração**. 2019.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica - Estudo de Caso**. 2011. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

GOMES, L. P. et al. **Gravimetria de resíduos sólidos depositados em aterro sanitário antes e durante a pandemia de covid-19**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 9, p. 233–244, 2021.

GOSENS J., LU Y., HE G., BLUEMLING B., BECKERS T. A. Sustainability effects of household scale biogas in rural China, **Energy Policy** (2012).

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados. Tucuruí - PA: IBGE, 2022**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/tucurui.html>>. Acesso em: 22 de mar. de 2023.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. (Org.). **Gestão Compartilhada de Resíduos Sólidos no Brasil: inovação com inclusão social**. São Paulo: Annablume, 2006.

JÚNIOR, M. R. V; CORRÊA, R. S. S. **Impactos socioambientais causados pelo aterro sanitário no município de Marituba-PA**. 2017.

LOPES, E. J.; OKAMURA, L. A.; YAMAMOTO, C. I. Formação de dioxinas e furanos durante a gaseificação de resíduos sólidos urbanos. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 32, p. 87-97, 2015.

MACHADO, Gilza Lopes; OLIVEIRA, André Luiz. **GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**. Revista Interface Tecnológica, v. 16, n. 1, p. 533-544, 2019.

MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2009. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco.

MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T.; NETO, A. C. Avaliação do Projeto Piloto de Recuperação do Biogás no Aterro da Muribeca/PE. In: **VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Anais**, Fortaleza, Ce. 2011. p. 1.

MAZIOLI, J. **Análise de sistemas de geração de energia usando resíduos sólidos urbanos: estudos de caso**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 66 páginas. 2019.

MDR - MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (Brasil). Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2022**. Brasília: SNS/MDR, 2022. Disponível em: <[https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/diagnosticos\\_snis](https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/diagnosticos_snis)>. Acesso em: 29 de ago. 2023.

MENDEZ, G. P.; MAHLER, C. F.; TAQUETTE, S. R. Gestão de Resíduos Sólidos: revisão sistemática de estudos qualitativos. **Ciência e Natura** , [S. l.] , v. 42, p. e36, 2022. DOI: 10.5902/2179460X43197. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/43197>. Acesso em: 24 nov. 2023.

MENEZES, R. O. et al. **Análise estatística da caracterização gravimétrica de resíduos sólidos domiciliares: estudo de caso do município de Juiz de Fora, Minas Gerais**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, p. 271-282, 2019.

MORGAN, G. et al. (2019) ‘Waste-to-Energy processes: what is the impact on air pollutants and health? A critical review of the literature’, **Environmental Epidemiology**, 3, p. 275. doi: 10.1097/01.EE9.0000608940.77808.aa.

NASCIMENTO, M. C. B. et al. **Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil**. Engenharia sanitaria e ambiental, v. 24, n. 1, p. 143–155, 2019.

National Research council (2000). **Waste incineration and public health**. National Academies Press.

NERIS, L. G. D. et al. **Política nacional de resíduos sólidos na perspectiva dos objetivos de desenvolvimento sustentável**. In: 6º Congresso Sul-americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais (IBEAS). Foz do Iguaçu-PR. 2023.

OLIVEIRA, B. O. S.; MEDEIROS, G. A. Evolução E Desafios No Gerenciamento Dos Resíduos Sólidos Urbanos Nos Estados Da Região Norte, Brasil. **Revista Valore**, v. 4, n. 1, p. 749–761, 2019.

PADILHA, J. L.; MESQUITA, A. L. A. Waste-to-energy effect in municipal solid waste treatment for small cities in Brazil. **Energy Conversion and Management**, v. 265, p. 115743, 2022.

PIN, B. V. R. et. al. Waste management studies in a Brazilian microregion: GHG emissions balance and LFG energy project economic feasibility analysis. **Energy Strategy Reviews**, v. 19, p. 31–43, 2018.

PNUD. Programa Das Nações Unidas Para O Desenvolvimento (2020). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em:< <https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/sustainable-development-goals.html>.> Acesso em: 25 de nov. De 2023.

ROCHA, S. M.; ROCHA, R. R. C.; LUSTOSA, K. B. Política Brasileira De Resíduos Sólidos: Reflexões Sobre A Geração De Resíduos E Sua Gestão No Município De Palmas-To. **Revista Esmat**, v. 9, n. 13, p. 29-44, dez/2017.

SANTO FILHO, F. **Estimativa do aproveitamento energético do biogás gerado por RSU no Brasil**. 2013. Dissertação de Mestrado em Energia. Programa de pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

SILVA, A. F.; ISHIHARA, J. H.; ALVES, C. L. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos do Município de Tucuruí, Estado do Pará, Norte do Brasil. **Rev. Bras. Gest. Amb. Sustent.** [online]. 2022, vol. 9, n. 22, p. 887-897. ISSN 2359-1412. DOI: 10.21438/rbgas(2022)092223.

SILVA, I. O.; TAGLIAFERRO, E. R.; OLIVEIRA, A. J. **Gerenciamento Dos Resíduos Sólidos Domiciliares No Município De Jales – Sp e Sua Relação para com a Política Nacional De Resíduos Sólidos (PNRS) / Household Solid Waste Management In The Municipality Of Jales - Sp And Its Relationship With The National Solid Waste Policy (PNRS)**. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 1, p. 11475–11499, 2021.

SINIR+. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/mapas/abetre/>>. Acesso em: 1 dez. 2023.

SOARES, E.L.S.F. **Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Rio de Janeiro: UFRJ. 2011.

SOUSA, N. M. **Diagnóstico e proposições para a atuação dos catadores da área de lixão de Tucuruí-PA**. 2022.

STAHEL, W. R. (2016). Circular economy. *Nature*, n. 531, pp. 435-438. DOI: <https://doi.org/10.1038/531435a>. Acesso em 16 de nov. de 2023.

TAGLIAFERRO, E. R.; VIANA, D. V. Caracterização Gravimétrica dos Resíduos Sólidos de um Aterro Sanitário Municipal no Interior do Estado de São Paulo. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, v. 7, n. 16, 2019.

TUCURUÍ. Secretaria de Meio Ambiente. **Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos: 2013**. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/24148748-Secretariamunicipal-de-meio-ambiente-de-tucurui-departamento-de-controleambiental.html>> . Acesso em: 22 de mar. 2023.

VIJAY, V. K.; PRASAD, R.; SINGH, J. P.; SORAYAN, V. P. S. A case for biogas energy application for rural industries in India. **Renewable Energy**. 1996. 9/1, 993-996

WEILAND, P., 2010. Biogas production: current state and perspectives. **Applied Microbiol. And Biotechnol.** 85(4), 849-860.