

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Gabriela Joppert Pedroso

**ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
(RSU) DO ATERRO SANITÁRIO NO MUNICÍPIO DE URUSSANGA – SC**

Araranguá
2021

Gabriela Joppert Pedroso

**ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
(RSU) DO ATERRO SANITÁRIO NO MUNICÍPIO DE URUSSANGA – SC**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheira de Energia.

Orientador: Prof. Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dr.

Coorientador: Prof. Reginaldo Geremias, Dr.

Araranguá
2021

Gabriela Joppert Pedroso

**ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
(RSU) DO ATERRO SANITÁRIO NO MUNICÍPIO DE URUSSANGA – SC**

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia,
foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes
membros:

Prof.(a) Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dr.(a)
Orientador(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Reginaldo Geremias, Dr.(a)
Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Elaine Virmond, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Gustavo Henrique Araújo dos Santos
Engenheiro Civil - Especialista em Energias Renováveis

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado
adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.

Prof. Luciano Lopes Pfitscher, Dr.
Coordenador do Curso

Prof.(a) Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dr.(a)
Orientadora

Gabriela Joppert Pedroso

Araranguá, 20 de maio de 2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e meus irmãos por todo amor, apoio e incentivo em todos os meus objetivos e sonhos.

Ao meu namorado e sua família, pelo suporte e carinho concedidos.

Aos meus orientadores, Prof.^a Dra. Kátia Madruga e Prof. Dr. Reginaldo Geremias pela sabedoria, paciência e atenção. Por exercerem seus papéis de professores com maestria, ensinando sempre com amor e generosidade, impactando na vida de quem tem o privilégio de serem seus alunos.

Ao engenheiro e mestrando do Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade da UFSC, Gustavo Santos, por compartilhar com benevolência todo seu grande conhecimento sobre o setor do biogás, como também seu conjunto de métodos e procedimentos os quais fizeram completa diferença na execução desse trabalho.

Ao programa de Graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina e pelo privilégio de estudar em uma das melhores universidades do país.

RESUMO

O presente estudo avaliou o potencial de energia elétrica a partir de biogás gerado pela decomposição dos resíduos sólidos urbanos dispostos no aterro sanitário do Consórcio Intermunicipal de Resíduos Sólidos Urbanos da Região Sul (CIRSURES), instalado no município de Urussanga em Santa Catarina. O aterro faz parte de um consórcio intermunicipal, composto por sete cidades das quais descartam seus resíduos no local referido. Em média, são recebidas 1300 toneladas de resíduos mensalmente. Para estimar o potencial energético dos RSU foi projetado o recebimento de resíduos numa nova célula, considerando sua operação dentro do período entre 2021 e 2041, com geração de gases até 2061. A modelagem utilizada foi a de primeira ordem, com elaboração de cálculos e gráficos em dois softwares específicos: Excel e Biogás. Os resultados obtidos indicaram uma vazão total estimada de 127.887.437,61 m³ de metano (CH₄) em todo período em que houve geração de gases pelos resíduos. A partir dos valores da vazão de CH₄, obteve-se a potência máxima para conversão em energia elétrica de 2373,81 kW. A estimativa de geração de energia elétrica em todo o período foi de 312,39 GWh. A partir disso, estimou-se que cerca de 4 mil residências poderiam ser abastecidas com energia elétrica gerada no aterro sanitário, considerando-se 16 mil habitantes com consumo médio mensal de 162 kWh. Constatou-se, ainda, que o aproveitamento energético do biogás seria capaz de evitar a emissão de 2.352.617,30 toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) nos 40 anos avaliados. Concluiu-se que a pesquisa se mostra importante para o crescimento e consolidação de novos projetos de usinas com aproveitamento de biogás gerado em aterros sanitários, bem como para o desenvolvimento de capacitações, de políticas públicas e do ambiente regulatório. Além disso, a investigação contribuiu para geração de dados para pesquisas e desenvolvimento na área de estudo.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Biogás. Potencial energético. Políticas públicas. Consórcio Intermunicipal de Resíduos Sólidos Urbanos da Região Sul.

ABSTRACT

The present study evaluated the potential of electric energy from biogas generated by the decomposition of urban solid waste disposed of in the landfill of the Intermunicipal Consortium of Solid Urban Waste of the Southern Region (CIRSURES), installed in the municipality of Urussanga in Santa Catarina. The landfill is part of an intermunicipal consortium, composed of seven cities that dispose of their waste at this location. On average, 1300 tons of waste are received monthly. In order to estimate the energy potential of MSW, a new cell was projected to receive waste, considering its operation in the period between 2021 and 2041, with gas generation until 2061. The modeling used was first order, with the elaboration of calculations and graphs in two specific softwares: Excel and Biogas. The results obtained indicated an estimated total flow of 127,887,437.61 m³ of methane (CH₄) throughout the period in which there was gas generation by waste. From the values of CH₄ flow, the maximum power for conversion into electric energy of 2373.81 kW was obtained. The estimated electric energy generation in the whole period was 312.39 GWh. From this, it was estimated that about 4 thousand residences could be supplied with electricity generated at the landfill, considering 16 thousand inhabitants with an average monthly consumption of 162 kWh. It was also found that the energy use of biogas would be able to avoid the emission of 2,352,617.30 tons of carbon dioxide equivalent (CO₂eq) in the 40 years evaluated. It was concluded that the research is important for the growth and consolidation of new projects of plants using biogas generated in landfills, as well as for the development of training, public policies and the regulatory environment. Furthermore, the investigation contributed to the generation of data for research and development in the study area.

Keywords: Municipal Solid Waste. Biogas. Energy potential. Public Policies. Consortium of Solid Urban Waste of the Southern Region.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Representação da Classificação dos Resíduos Sólidos. | 19 |
| Figura 2 – Geração de RSU em alguns países. | 21 |
| Figura 3 - Representação da geração de RSU per capita no Brasil e suas regiões.. | 23 |
| Figura 4 - Representação da disposição final dos RSU no Brasil. | 24 |
| Figura 5 - Cartograma dos Aterros Sanitários de Santa Catarina. | 25 |
| Figura 6 - Hierarquia da Gestão e Gerenciamento dos RSU. | 30 |
| Figura 7 - Etapas do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos..... | 31 |
| Figura 8 - Fases de biodegradação dos RSU e geração de gases. | 34 |
| Figura 9 - Representação de um sistema de extração de gás vertical..... | 42 |
| Figura 10 - Representação de um sistema de extração de gás de aterro horizontal. | 43 |
| Figura 11 - Imagem do Aterro Sanitário da CIRSURES em Urussanga - SC. | 51 |
| Figura 12 - Logotipo do software Biogás e logotipo do software Excel. | 52 |
| Figura 13 – Disposição dos RSU pelos municípios do consórcio..... | 58 |
| Figura 14 – Geração de RSU de 2021 a 2041. | 60 |
| Figura 15 – Geração de Metano Mês/Ano. | 61 |
| Figura 16 - Geração de metano em 40 anos (Software Excel)..... | 64 |
| Figura 17 - Geração de metano em 40 anos (Software Biogás). | 65 |
| Figura 18 - Geração de metano estimada para o período de 2021 a 2061 conforme os meses do ano..... | 66 |
| Figura 19 - Potência gerada pela vazão de metano de 2021 a 2061..... | 70 |
| Figura 20 - Energia gerada pela vazão de metano de 2021 a 2061..... | 70 |
| Figura 21 - Emissões evitadas de CO_2eq com o aproveitamento do biogás de aterro. | 71 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Representação dos Níveis de Renda com a Geração Média de RSU. | 22 |
| Tabela 2 - Representação da Composição do Biogás. | 36 |
| Tabela 3 - Valores Sugeridos de L_0 e k | 53 |
| Tabela 4 - RSU dispostos no aterro sanitário da CIRSURES no ano de 2020..... | 57 |
| Tabela 5 - RSU dispostos no aterro da CIRSURES no período de operação da célula. | 59 |
| Tabela 6 - Geração de metano de 2021 a 2061..... | 62 |
| Tabela 7 - Geração de potência e energia de 2021 a 2061. | 68 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE - Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública
CaOH – Hidróxido de Cálcio
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH₄ – Metano
CIRSURES - Consórcio Intermunicipal de Resíduos Sólidos Urbanos da Região Sul
CMS₃K - peneiras moleculares de carbono
CO – Cobalto
CO_{2eq} – Dióxido de Carbono equivalente
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
H₂S - Sulfeto de hidrogênio
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K - Potássio
LandGEM - Modelo de Emissões Atmosféricas de Aterros
MDEA - mono-di-metil etanolamina
MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MEA - mono-etanolamina
Na - Sódio
NaOH – Hidróxido de Sódio
NH₃ – Hidróxido de Amônia
PEAD - polietileno
PERS - Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Santa Catarina
pH - Potencial Hidrogeniônico
PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNRS - Política Nacional dos Resíduos Sólidos
PSA - Adsorção por oscilação de pressão
PVC - cloreto de polivinila
RSU - Resíduos Sólidos Urbanos
Sinir - Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TSA - Adsorção por oscilação de temperatura
USEPA - United States Environmental Protection Agency

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO/JUSTIFICATIVA..... | 13 |
| 2 OBJETIVOS..... | 16 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL..... | 16 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 16 |
| 3 REFERENCIAL TEÓRICO..... | 17 |
| 3.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS | 17 |
| 3.2 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS | 19 |
| 3.3 GERAÇÃO DE RSU NO MUNDO | 20 |
| 3.4 GERAÇÃO DE RSU NO BRASIL | 22 |
| 3.5 GERAÇÃO DE RSU EM SANTA CATARINA | 24 |
| 3.6 IMPACTOS DOS RSU NO MEIO BIÓTICO, ABIÓTICO E NA SAÚDE HUMANA | 25 |
| 3.7 GESTÃO E GERENCIAMENTO INTEGRADO DOS RSU | 27 |
| 3.8 HIERARQUIA DE RESÍDUOS E DESMATERIALIZAÇÃO | 28 |
| 3.9 ETAPAS DO GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS..... | 31 |
| 3.10 GÁS DE ATERRO | 33 |
| 3.11 FATORES QUE INFLUENCIAM A FORMAÇÃO DE BIOGÁS de aterro..... | 36 |
| 3.12 IMPUREZAS DO BIOGÁS..... | 38 |
| 3.12.1 Remoção das impurezas do biogás..... | 38 |
| 3.13 EXTRAÇÃO DO BIOGÁS DE ATERROS | 41 |
| 3.14 CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA..... | 43 |
| 3.15 MODELAGENS DE ESTIMATIVA DE GERAÇÃO de biogás de aterros sanitários..... | 44 |
| 3.16 MODELAGEM DE EMISSÕES EVITADAS DE <i>CO₂eq</i> | 47 |
| 3.17 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O GERENCIAMENTO DE RSU | 48 |
| 4 METODOLOGIA | 50 |
| 4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 50 |
| 4.2 LOCAL DE ESTUDO..... | 50 |
| 4.3 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE METANO E ENERGIA ELÉTRICA | 52 |
| 4.4 ESTIMATIVA DE EMISSÕES EVITADAS DE <i>CO₂eq</i> | 55 |
| 4.5 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RSU..... | 55 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 56 |
| 5.1 ESTIMATIVA DE RSU NO ATERRO SANITÁRIO DA CIRSURES..... | 56 |
| 5.2 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO..... | 60 |
| 5.3 POTÊNCIA E GERAÇÃO DE ENERGIA | 66 |
| 5.4 EMISSÕES EVITADAS DE <i>CO₂eq</i> | 71 |
| 5.5. SUBSÍDIOS PARA OS GESTORES DO CONSÓRCIO..... | 72 |
| 6 CONCLUSÕES | 74 |

1 INTRODUÇÃO/JUSTIFICATIVA

Com a crescente expansão populacional, das atividades industriais e de novas tecnologias, a busca pela qualidade de vida e o consumo exacerbado são variáveis notórias deste cenário, trazendo como consequência direta a grande geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, desenvolvido pela Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública (Abrelpe), em 2018 foram gerados 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos no país. Desse montante 59,5% dos resíduos foram dispostos de maneira adequada, o restante, 29,5 milhões de toneladas foram despejados de maneira incorreta em lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2018).

Atualmente, o Brasil é o maior gerador de lixo da América Latina. Nesse sentido, é importante que o país busque soluções práticas para mitigar esse problema que afeta o meio ambiente, a saúde humana e a economia (ONU, 2018).

A demanda por energia elétrica acompanha e se apresenta como pilar do crescimento e desenvolvimento social, sendo constantemente moldada e projetada para atuar de maneira limpa e renovável. Unindo essas necessidades e demandas, a de um destino correto para os resíduos sólidos urbanos e a de geração de energia limpa, tem-se como alternativa a geração de energia elétrica a partir do biogás dos resíduos sólidos urbanos dispostos nos aterros sanitários (EPE, 2019).

A geração de energia elétrica a partir do biogás contribui para a descentralização e diversificação da matriz energética. Trata-se de uma opção para a substituição das fontes de energia fósseis, que são extremamente poluentes e prejudiciais ao meio ambiente (BRIGAGÃO et al., 2020).

Outro fator importante na geração de biogás a partir dos RSU são as reduções significativas de emissões de gases de efeito estufa na atmosfera, visto que o metano (CH_4) produzido pelos resíduos sólidos urbanos na geração de biogás é convertido em dióxido de carbono (CO_2) que é 28 vezes menos poluente que o metano (CETESB, 2020).

Essas emissões evitadas de serem lançadas na atmosfera podem ser convertidas em créditos de carbono. Uma tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) corresponde a um crédito de carbono. Esses créditos de carbono geram certificados que podem ser comercializados no mercado internacional. A

comercialização desses créditos além de gerar um retorno financeiro, coloca a preservação ambiental como um investimento e não como prejuízo (TEIXEIRA et al., 2010).

A partir destes pressupostos, o presente trabalho avaliou o possível aproveitamento energético a partir dos RSU dispostos em um aterro sanitário na região do extremo sul de Santa Catarina.

O aterro sanitário estudado, está localizado no município de Urussanga, que é gerido pelo Consórcio Intermunicipal de Resíduos Sólidos Urbanos da Região Sul (CIRSURES). O consórcio é responsável pela gestão dos RSU de 7 municípios. Os resíduos recebidos pelo aterro não possuem aproveitamento energético, apenas são dispostos no local destinado, sem nenhum tipo de recuperação.

Com isso, investigou-se neste aterro o potencial energético do biogás gerado pela decomposição dos resíduos para a geração de energia elétrica. Igualmente realizou-se o levantamento das emissões evitadas de dióxido de carbono equivalentes com o aproveitamento desses resíduos.

Todas as modelagens feitas nesta investigação foram efetuadas, por meio de cálculos e *softwares*. O *software* “Biogás”, desenvolvido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), foi utilizado para modelar a vazão do metano provinda dos RSU, a potência gerada por esses resíduos, bem como a emissões de dióxidos de carbono evitadas. Todos os cálculos foram executados e conferidos também no *software* “Excel”, a fim de ter uma maior precisão nos dados obtidos.

O potencial energético dos RSU para a geração de energia elétrica desperta grande interesse dos profissionais de engenharia de energia. Estudos desta natureza podem conciliar conhecimentos teóricos que são obtidos durante a formação, em disciplinas como Gerenciamento e Tratamento de Resíduos, Gestão e Eficiência Energética, Valoração de Impactos, Empreendedorismo na Engenharia de Energia, entre outras. Os temas tratados nas disciplinas geram subsídios para capacitar o futuro profissional da área a buscar soluções, ou seja, integrar gerenciamento de resíduos à geração de energia associada à proteção climática.

O presente trabalho serve como subsídio para empresas privadas, entidades públicas e instituições de ensino, que buscam implementar projetos de aproveitamento energético do biogás através dos RSU em aterros sanitários. Auxilia, também, nos estudos de mitigação e solução do problema da falta de planejamento e gerenciamento dos resíduos gerados nos municípios.

Além disso, nesta investigação são apresentadas políticas públicas existentes no Brasil voltadas ao incentivo e consolidação do compromisso de toda a sociedade com o consumo consciente e a destinação correta e o aproveitamento dos RSU.

Este trabalho foi dividido em seis seções, incluindo a presente Introdução. A seção dois apresenta os objetivos da pesquisa. A seção três aborda a revisão bibliográfica, onde está presente a fundamentação teórica do estado da arte dos principais conteúdos relacionados ao tema da pesquisa. A seção quatro aponta a metodologia usada, exibindo o aterro sanitário que foi investigado, os cálculos e softwares utilizados nas modelagens. A seção cinco traz os resultados obtidos e sua análise a partir da metodologia escolhida, assim como uma breve discussão desses resultados. Por fim, a seção seis descreve as conclusões do estudo, bem como as sugestões para futuras investigações.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa teve como objetivo geral estimar o potencial de geração de energia elétrica proveniente de biogás produzido por resíduos sólidos urbanos e as emissões evitadas de dióxido de carbono equivalentes (CO_2eq), no aterro do Consórcio Intermunicipal de Resíduos Sólidos Urbanos da Região Sul (CIRSURES) no município de Urussanga.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar o estudo da arte sobre o tema relacionado a presente pesquisa, mediante a revisão bibliográfica;
- Calcular o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzidos pelos RSU dispostos no aterro sanitário da CIRSURES, no município de Urussanga-SC;
- Estimar as emissões evitadas de CO_2eq pelo aproveitamento energético dos RSU no aterro sanitário da CIRSURES, no município de Urussanga – SC;
- Gerar subsídios para os gestores dos municípios do consórcio que possam apoiar a implementação das políticas públicas para gestão de RSU integrada ao aproveitamento energético.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT com sua norma NBR 10004, define os resíduos sólidos sendo:

“Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.” (NBR 10004, 2004).

A definição da ABNT é bastante ampla e genérica do ponto de vista da gestão e do gerenciamento dos resíduos sólidos, considerando que há vários tipos de resíduos com composição química, propriedades físicas e estrutura distintas. Há, então, uma necessidade de separar esses resíduos por características semelhantes para uma melhor eficiência em todo o processo, da coleta até a disposição final (BONNECARRERE, 2017).

Existem diversas maneiras de classificar os resíduos sólidos, sendo as mais usuais as classificações quanto à origem e quanto aos possíveis danos ao meio ambiente (SANTOS, 2020).

A Classificação em relação a origem se dá em 5 classes distintas:

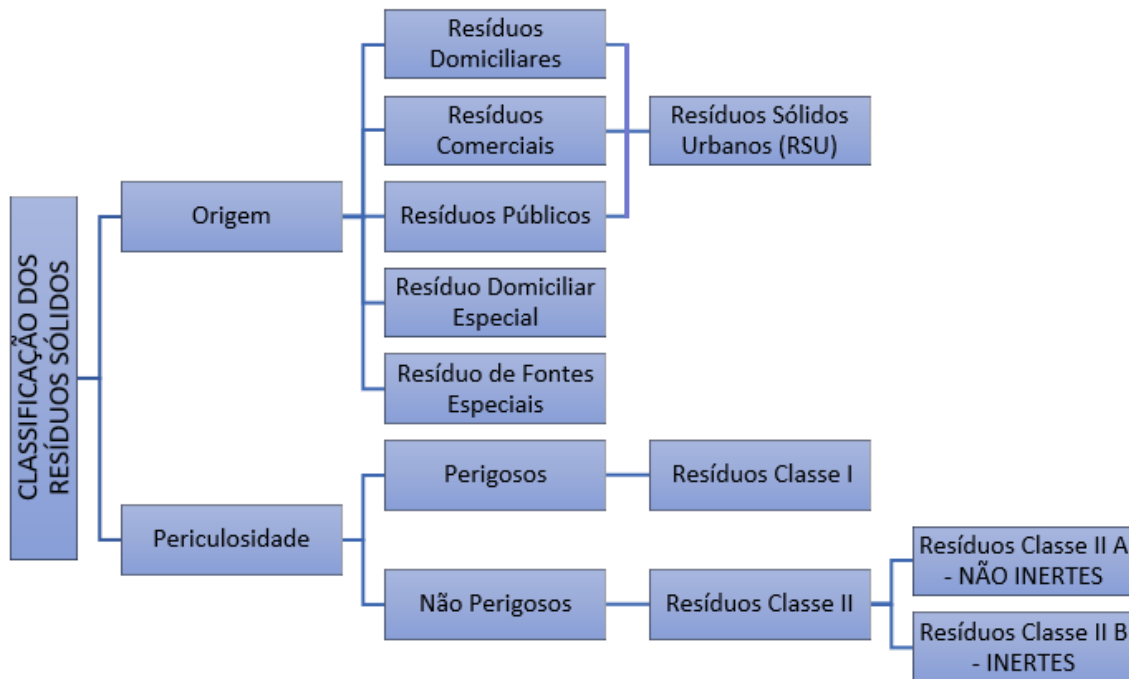
- Lixo Doméstico ou Residencial: São os resíduos gerados nos domicílios.
- Lixo Comercial: São os resíduos gerados em estabelecimentos comerciais.
- Lixo Público: São os resíduos presentes nos logradouros públicos, e também aqueles descartados irregular e indevidamente pela população.
- Lixo Domiciliar Especial: Grupo que compreende os entulhos de obras, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes e pneus.
- Lixo de Fontes Especiais: São resíduos que, em função de suas características peculiares, passam a merecer cuidados especiais na gestão e gerenciamento. Ex.: resíduo industrial, radioativo, resíduos de serviços da saúde, entre outros.

A classificação dos resíduos sólidos segundo a ABNT NBR 10004/2004, que relaciona os resíduos sólidos urbanos com seus potenciais riscos de contaminação do meio ambiente e da saúde humana são:

- **Resíduos Classe I – Perigosos:** São resíduos que apresentam periculosidade, gerando algum tipo de risco à saúde pública. Os resíduos classificados como perigosos devem ainda apresentar ao menos uma dessas características: corrosividade, reatividade, inflamabilidade, toxicidade e patogenicidade.
- **Resíduos Classe II – Não perigosos:** Os resíduos considerados não perigosos são os que não apresentam nenhuma das características mencionadas nos considerados perigosos. Estes são divididos em duas subclasses.
- **Resíduos Classe II A – Não Inertes:** Os resíduos considerados não inertes são os que quando submetidos ao contato dinâmico ou estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, tiverem um ou mais de seus constituintes solubilizados e lixiviados.
- **Resíduos Classe II B – Inertes:** Os resíduos considerados inertes, são os que quando submetido a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A Figura 1 apresenta, de forma resumida, a classificação dos resíduos sólidos, segundo sua origem e periculosidade.

Figura 1 - Representação da Classificação dos Resíduos Sólidos.



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

3.2 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Segundo a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos sólidos urbanos (RSU) podem ser considerados como resíduos domiciliares, comerciais e de limpeza pública, se originam de varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana (PNRS, 2010).

Os RSU são aqueles gerados pelas diversas atividades desenvolvidas em áreas com afluência populacional. Isso significa que quanto maiores os centros urbanos, cidades, metrópoles, maior a geração per capita de resíduos (BRIGAGÃO et al., 2020).

A caracterização desses resíduos é variável, conforme número de habitantes, hábitos e costumes populacionais, aspectos econômicos, culturais, geográficos, de cada município. Os resíduos sólidos urbanos são compostos em sua grande maioria por matéria orgânica, papel, plástico, vidro, metais entre outros (IBAM, 2001).

A classificação dos RSU, segundo a NBR 10004 da ABNT, pode ser estudada conforme suas características físicas, químicas e biológicas. Dentre as características físicas estão:

- Geração Per Capita: A geração per capita relaciona a quantidade de resíduos urbanos gerada diariamente e o número de habitantes de cada localidade.
- Composição Gravimétrica: A composição gravimétrica traduz o percentual de cada componente em relação a massa total da amostra de resíduo analisada.
- Peso Específico Aparente: Peso específico aparente é o peso do lixo solto em função do volume ocupado livremente, sem qualquer compactação, expresso em kg/m^3 .
- Teor de Umidade: Teor de umidade representa a quantidade de água presente no resíduo, medida em percentual mássico.
- Compressividade: Compressividade é o grau de compactação ou a redução do volume que uma massa de resíduos pode sofrer quando compactada.

As características químicas compreendem:

- Poder Calorífico: Esta característica química indica a capacidade potencial de um material desprender determinada quantidade de calor quando submetido à queima.
- Potencial Hidrogeniônico (pH): O potencial hidrogeniônico indica o teor de acidez ou alcalinidade dos resíduos.
- Composição Química: Consiste na determinação dos teores de cinzas, matéria orgânica, carbono, nitrogênio, potássio, cálcio, fósforo, resíduo mineral total, resíduo mineral solúvel e gorduras.
- Relação Carbono/Nitrogênio (C:N): A relação carbono/nitrogênio indica o grau de decomposição da matéria orgânica do resíduo nos processos de tratamento/disposição final.

As características biológicas dos RSU são aquelas determinadas pela população microbiana e dos agentes patogênicos presentes que, aliado às outras características, permitem que sejam selecionados os métodos de tratamento e disposição final mais adequados (ABNT, 2004).

3.3 GERAÇÃO DE RSU NO MUNDO

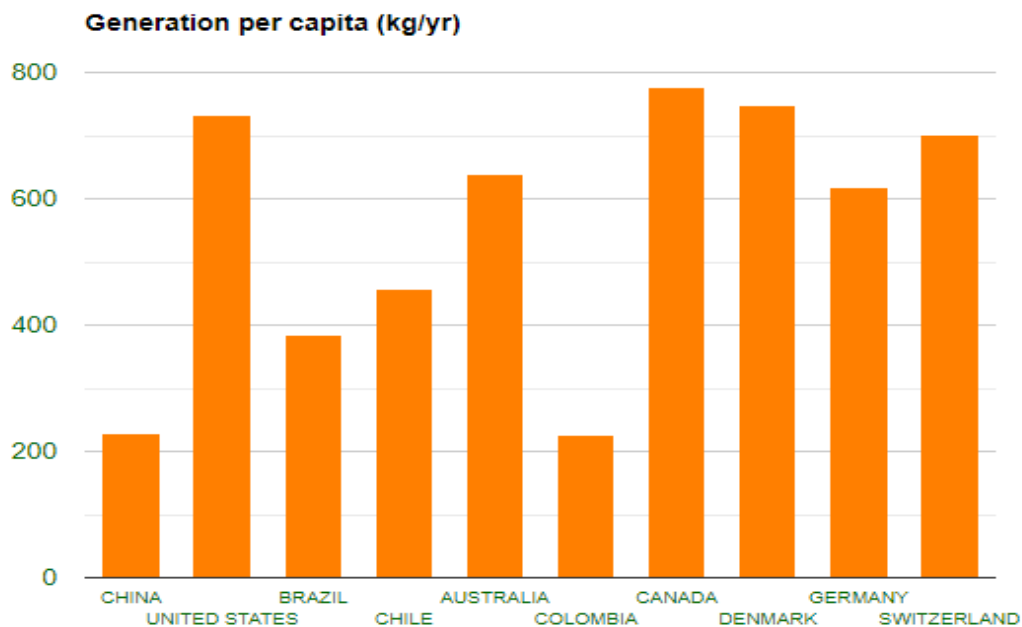
O mundo está propenso a um estilo de vida cada vez mais urbano, onde a produção das grandes indústrias e o consumo por parte da população crescem

exponencialmente. Esse consumo, geralmente, é imediatista e sem grandes preocupações com os resíduos gerados, sendo a grande maioria descartados após seis meses de consumo, em média. A população mundial, atualmente, é de 7,8 bilhões de seres humanos, que geram mais de 2 bilhões de toneladas de RSU por ano (ONU, 2018).

Conforme o relatório *What a Waste: a Global review of solid waste management*, elaborado pelo Banco Mundial, em 2002 2,9 bilhões de pessoas residiam nos centros urbanos, sendo que um habitante gerava cerca de 0,64 kg de RSU por dia. (Banco Mundial, 2012). Na atualidade, quase 4 bilhões de pessoas vivem nos grandes centros, gerando 1,2 kg de resíduos diariamente, resultando em mais de 400 kg de RSU gerados por uma única pessoa por ano (ONU, 2020).

A Figura 2 demonstra que esses 400 kg de resíduos gerados por cada indivíduo no ano não são distribuídos uniformemente em todos os países.

Figura 2 – Geração de RSU em alguns países.



Fonte: Waste Atlas, 2020.

A distribuição *per capita* da geração dos RSU está intimamente ligada às condições financeiras e de desenvolvimento dos países. Quanto mais desenvolvido, maior tende a ser o consumo e conseqüentemente maior a geração de RSU. Países industrializados como Estados Unidos, Austrália, Canadá, Alemanha, Dinamarca e Suíça têm uma geração de RSU per capita acima de 600 kg/ano, enquanto os países

em desenvolvimento como Brasil, Colômbia e China estão próximos a metade da produção dos países desenvolvidos (IPEA, 2020).

A Tabela 1 demonstra essa relação da renda per capita com a taxa de geração de RSU per capita.

Tabela 1 - Representação dos níveis de renda com a geração média de RSU.

| Nível de Renda | Geração Média de RSU (kg/per capita/dia) |
|-----------------------|---|
| Renda Baixa | 0,6 – 1,0 |
| Renda Média | 0,8 – 1,5 |
| Renda Alta | 1,1 – 4,5 |

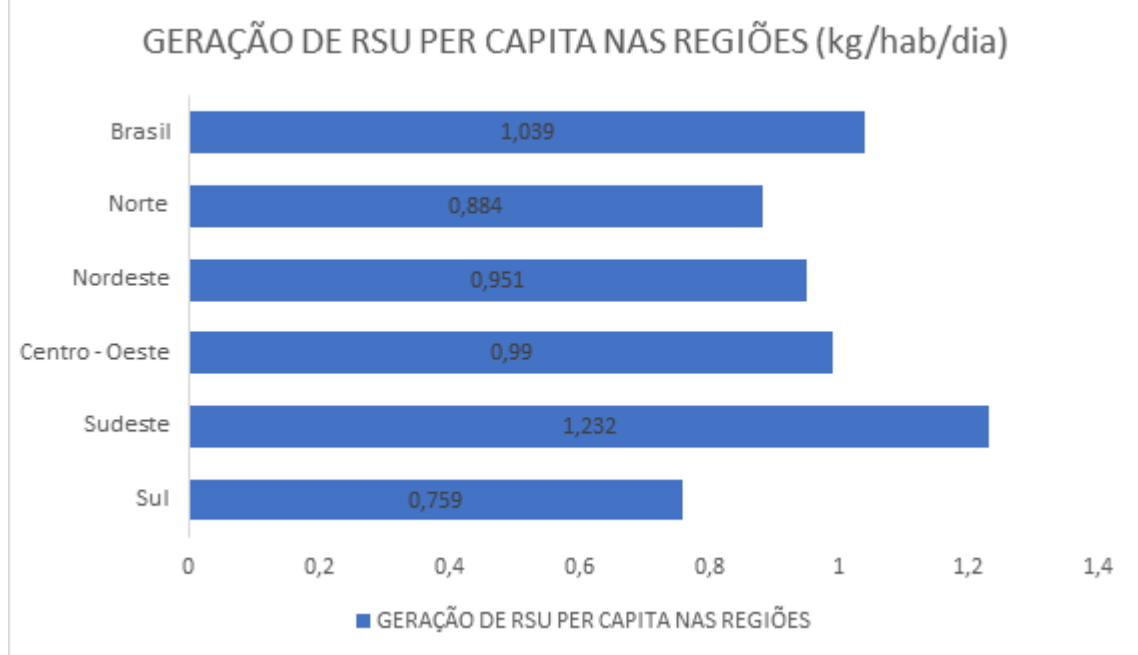
Fonte: Relatório What a Waste, Banco Mundial, 2017.

3.4 GERAÇÃO DE RSU NO BRASIL

No Brasil, estima-se que foram gerados 79 milhões de toneladas de resíduos em 2018. Desse montante, 43,3 milhões de toneladas tiveram destinação final adequada, os outros 29,5 milhões de toneladas foram dispostos de maneira imprópria. Com uma população de 209 milhões de habitantes, a média de geração de RSU por pessoa foi de 380 kg por ano (IPEA, 2020).

A Figura 3 aponta as regiões brasileiras e a geração per capita de RSU por dia.

Figura 3 - Representação da geração de RSU per capita no Brasil e suas regiões.



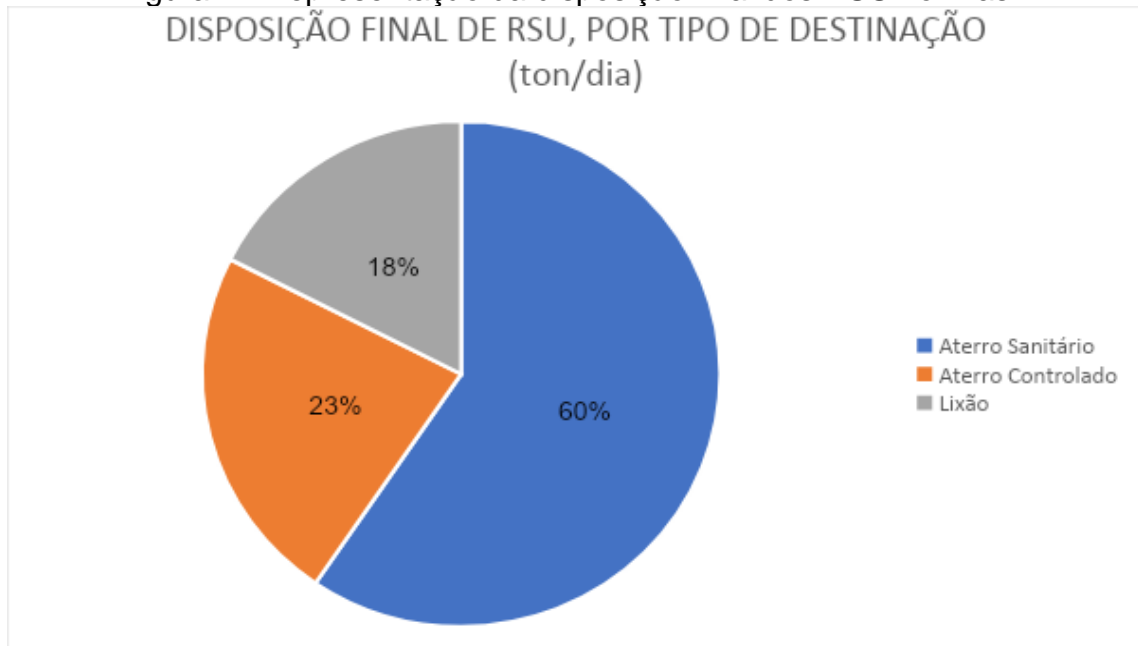
Fonte: Adaptado do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – Abrelpe, 2019.

Os municípios analisados neste trabalho pertencem ao estado de Santa Catarina, localizado na região Sul, sendo a região de menor área territorial do Brasil. Segundo o Panorama da Abrelpe, em 2018 essa região gerou 22.586 toneladas diárias de RSU, mais de 6 mil toneladas desse total foram encaminhadas para locais inadequados (Abrelpe, 2018).

Visto que a produção dos RSU aumenta gradativamente, os órgãos públicos, juntamente com as empresas privadas e a população em geral devem se conscientizar e promover meios para um melhor gerenciamento e destino para os RSU, que, quando mal dispostos, podem causar diversos malefícios a saúde da população e o meio ambiente (BRIGAGÃO, 2020).

A Figura 4 mostra como ocorre a disposição final dos RSU no Brasil.

Figura 4 - Representação da disposição final dos RSU no Brasil.



Fonte: Adaptado do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – Abrelpe, 2019.

No Brasil, apenas 59% dos RSU são dispostos em ambientes onde se é respeitado o distanciamento populacional, a cobertura diária que deve ser feita dos resíduos, o monitoramento das águas subterrâneas e o tratamento devido de chorume. Os locais com tais cuidados são os aterros sanitários, que de acordo com o Ministério do Meio Ambiente é o lugar mais adequado no Brasil para disposição de RSU. Todo o resto, ou seja, 41% dos resíduos são dispostos à deriva, colocando em risco a população, o ecossistema do entorno e o meio ambiente (CETESB, 2017).

3.5 GERAÇÃO DE RSU EM SANTA CATARINA

Conforme o Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Santa Catarina (PERS), a quantidade total estimada de geração de RSU é de 1.826.854,86 toneladas por ano.

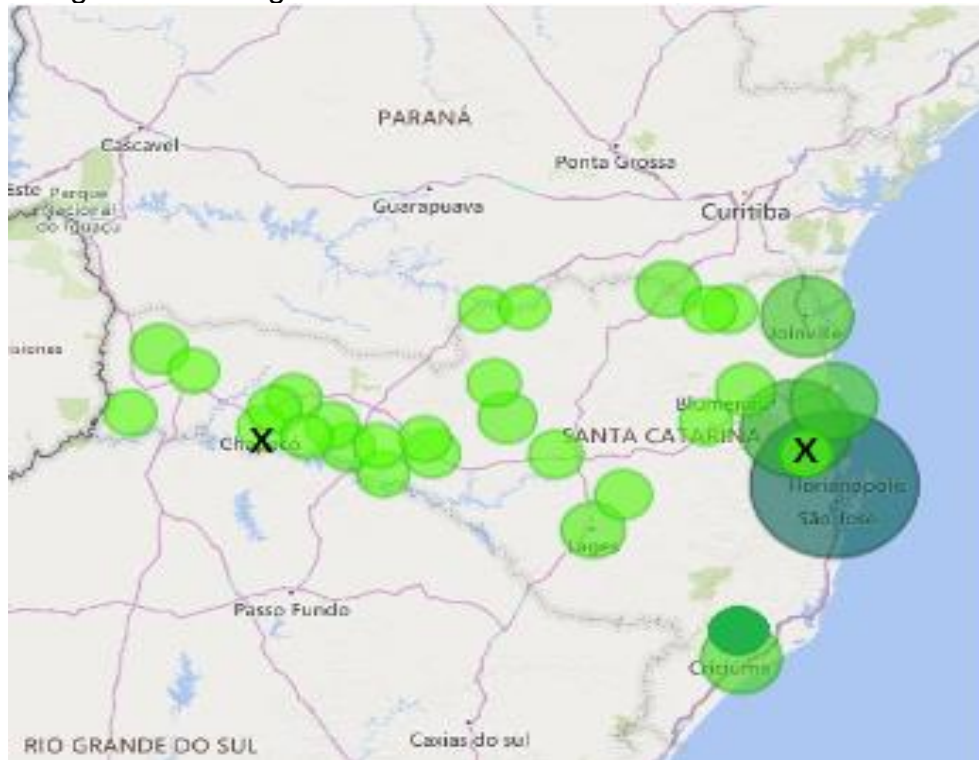
Em decorrência do Programa “Lixo Nosso de Cada Dia” criado pelo Ministério Público, no ano de 2001 em Santa Catarina, houve modificação em termo de diretriz para a destinação final dos RSU. O Programa levantou diversos termos de compromisso com vários municípios, cobrando a totalidade das disposições dos RSU do Estado de maneira correta, ou seja, em aterros sanitários (PERS, 2018).

Atualmente, existem 34 aterros sanitários em Santa Catarina, que recebem os RSU dos 295 municípios. Dos 34 aterros, 79,41% são administrados por empresas

privadas, 17,64% são operados pelo município ou por meio de consórcios intermunicipais, e os outros 2,95% por associação de catadores (PERS, 2018).

A Figura 5 apresenta o cartograma de localização dos aterros sanitários de Santa Catarina.

Figura 5 - Cartograma dos Aterros Sanitários de Santa Catarina.



Fonte: Adaptado do Sistema Nacional de Informação Sobre Saneamento - SNIS, 2017.

Os círculos verdes na Figura 5 são as representações dos aterros sanitários em Santa Catarina. O levantamento do número de aterros sanitários pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) foi realizado em 2017, contando com 34 unidades distribuídas pelo Estado. Desde então, 2 unidades foram desativadas, nas cidades de São João Batista e Chapecó, das quais estão representadas com um “x” em cima do círculo verde. O círculo na cor verde escura representa o aterro sanitário em Urussanga, estudado neste trabalho. Atualmente, Santa Catarina conta com 29 aterros sanitários em funcionamento (SNIS, 2017).

3.6 IMPACTOS DOS RSU NO MEIO BIÓTICO, ABIÓTICO E NA SAÚDE HUMANA

Conforme já mencionado, o Brasil descarta mais de 15,9 milhões de toneladas de resíduos de maneira incorreta, seja em lixões a céu aberto, em aterros controlados, ou até mesmo nas ruas e encostas. Esses resíduos são descartados sem qualquer

tipo de consciência ambiental, social ou até mesmo considerando a preservação da saúde humana (SNIS, 2019). Os RSU causam diversos malefícios ao meio biótico, abiótico e para a população, a saber:

Os impactos causados no meio biótico podem ser divididos nos impactos causados na flora e os causados na fauna. A flora é intensamente afetada com a disposição incorreta dos RSU. Por conta das diversas substâncias tóxicas que os resíduos podem liberar, acaba ocorrendo a contaminação das plantas e árvores. Essa contaminação modifica e altera a diversidade biótica do local, acarretando degradação, perda da diversidade de espécies e mudanças na paisagem natural (MENDONÇA et al., 2017).

Os impactos dos RSU causados na flora impactam diretamente na vida dos animais e organismos que nela residem. Além da interferência nos *habitats* desses animais, eles acabam com frequência confundindo os resíduos com alimentos, sendo intoxicados. A migração da fauna desses ambientes poluídos pelos resíduos é consequência, assim como a proliferação de bichos peçonhentos (MENDONÇA et al., 2017).

Os impactos causados pelos RSU no meio abiótico significam todos aqueles que atingem as águas, os solos e o ar. Muitas vezes os RSU são dispostos de maneira incorreta em corpos hídricos, ou próximo às margens desses corpos hídricos, fazendo com que os lixiviados dos resíduos contaminem ou alterem a qualidade dessas águas. Esses resíduos, quando dispostos em fluxos d'água, também podem ocasionar enchentes, deslizamentos e entupimento das redes de drenagem (MARQUES, 2011).

Os principais impactos causados pelos RSU nas águas são: A redução dos níveis de oxigênio dissolvido; elevação da demanda bioquímica de oxigênio; águas mais ácidas; elevação de sedimentos; presença de bactérias e contaminantes; recorrente contaminação dos organismos que entram em contato com essas águas, inclusive o ser humano (INNOCENTI et al., 2020).

Os RSU quando dispostos no solo acabam por poluí-lo, pela presença de óleos, solventes, gorduras, metais pesados e ácidos, entre outras substâncias dos resíduos que acabam por modificar suas características físicas, químicas e biológicas.

O acúmulo de altos teores de metais pesados pode ocasionar em criadouro de vetores de doenças, como roedores, moscas, bactérias e vírus (SILVA et al., 2014). Um dos maiores contaminantes que os solos acabam recebendo é o chorume, um líquido escuro e malcheiroso resultante do armazenamento de resíduos.

O chorume lixivia os solos, os subsolos e até mesmo os lençóis freáticos (LIBÂNIO, 2002). Os impactos mais comuns no solo causados pela contaminação dos RSU são: redução da fertilidade do solo, erosão, desequilíbrio do ecossistema, diminuição da vegetação nativa, liberação de gases poluentes, contaminação dos alimentos e desertificação (INNOCENTI et al., 2020).

No processo de decomposição dos RSU ocorre a liberação de gases como o metano, óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, dióxidos de enxofre, entre outros gases dos quais são extremamente poluentes e tóxicos. Quando não ocorre o tratamento ou disposição adequada dos RSU, esses gases são lançados diretamente na atmosfera, contribuindo com efeitos como a chuva ácida e o buraco da camada de ozônio, conseqüentemente contribuindo com a poluição do ar (INNOCENTI et al., 2020).

A saúde humana é um dos fatores mais vulneráveis à má disposição dos RSU. Moradores próximos a aterros controlados ou lixões sofrem com alergias, tanto respiratórias como na pele, fortes odores e invasões de pragas nas suas residências. Entretanto, não são apenas os vizinhos dos lixões ou catadores que sentem esses impactos. A população urbana também os percebe na qualidade do ar, na qualidade das águas, nas enchentes, desabamentos, doenças diversas e poluição do meio em que vivem, por conta de um excessivo número de resíduos dispostos de maneira indevida (SIQUEIRA et al., 2009)

3.7 GESTÃO E GERENCIAMENTO INTEGRADO DOS RSU

A gestão dos RSU engloba leis, propostas e medidas destinadas a reduzir os resíduos e os impactos sociais, ambientais e a saúde humana causados por esses. O objetivo da gestão é lidar de maneira sustentável com a grande problemática em relação à crescente geração de RSU, e apontar soluções eficientes, economicamente viáveis e possíveis de implementação. A gestão é responsável pelo planejamento das ações que o gerenciamento executa (IBAM, 2001).

Geração, coleta, transbordo, valorização e disposição dos resíduos são algumas das atividades as quais tem a supervisão e manutenção da gestão, bem como o cuidado com a vida útil dos locais de destinação dos resíduos e a qualidade dos serviços prestados durante essas atividades (SANTOS, 2018).

A lei 12.305 de 02 de agosto 2010, a qual instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), define a Gestão Integrada de Resíduos Sólidos como: “O conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável” (MMA, 2010).

A gestão integrada deve ser empregada por cada município, assim como as atividades e outorgas do setor. O município tem a liberdade para atuar estrategicamente na gestão dos resíduos, levando em consideração todas as particularidades, potencialidades, limitações e algumas possíveis parcerias com o setor privado (SILVA et al., 2015).

Já o gerenciamento dos resíduos sólidos é a execução das medidas tomadas pela gestão, sendo responsável pelas atuações direta ou indireta na coleta, no transporte, no transbordo, no tratamento e na destinação final adequada dos resíduos. O gerenciamento dos resíduos, bem como suas competências, são incumbência de todos os geradores. Isso inclui a população, o governo, iniciativas privadas e a sociedade civil organizada (SILVA et al., 2019).

O gerenciamento integrado dos RSU compreende a articulação conjunta das etapas de execução de suas atividades planejadas pela gestão integrada, incluindo desde a não geração dos resíduos até a disposição final (MMA, 2014).

Este tipo de gerenciamento é uma das vertentes do saneamento ambiental, sendo a implementação de responsabilidade municipal. O município tem autonomia sobre a preservação, atuação e modificações necessárias dessas medidas para assegurar a saúde da população e do meio em que vivem (POLZER, 2017).

3.8 HIERARQUIA DE RESÍDUOS E DESMATERIALIZAÇÃO

Conforme SANTOS et al. (2018), para uma gestão e gerenciamento de RSU eficientes, sustentáveis e com bom desempenho das etapas executadas, algumas práticas de conscientização na geração dos RSU são ofertadas à população, com o intuito de amenizar os impactos e o consumo exagerado.

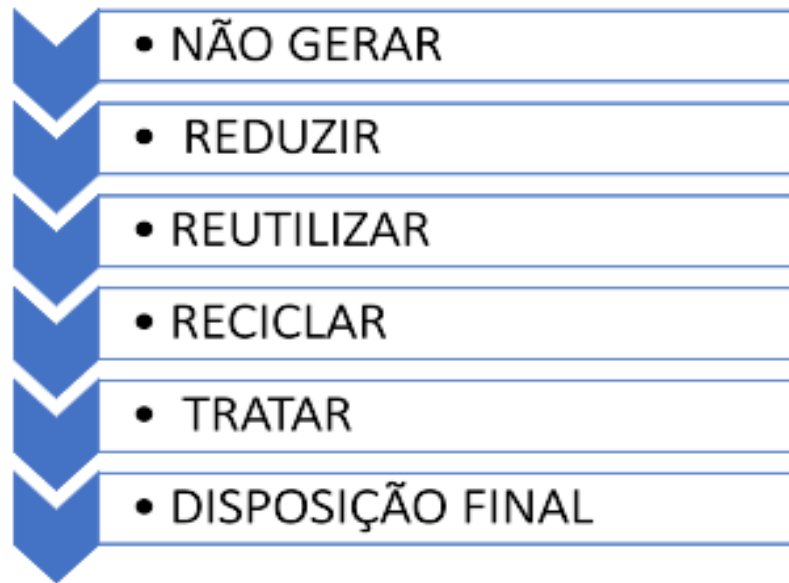
As práticas são organizadas de maneira hierárquica de prioridades. A ordem de prioridades começa na não geração indo até a disposição final dos rejeitos quando todas as possibilidades de tratamento e recuperação foram consideradas, não

havendo outra alternativa senão a disposição final ambientalmente correta (MMA, 2010). Essas práticas podem, assim, serem caracterizadas:

- **Não Geração:** A não geração dos resíduos preza pela conscientização ao consumir, visto que aquisição de produtos de maneira imediatista leva a geração e disposição deste resíduo de maneira rápida e impactante ao ambiente.
- **Redução:** A redução preza pelo consumo somente do necessário, sem exageros e desperdícios, como por exemplo o uso racional da água e energia elétrica.
- **Reutilização:** A reutilização consiste em aproveitar os produtos já adquiridos dos quais aparentemente não possuem mais funcionalidades. Reduzindo assim de maneira considerável o consumo, e conseqüentemente a redução dos resíduos descartados.
- **Reciclagem:** A reciclagem consiste em um dos métodos de tratamento dos RSU o qual se aproveita os produtos descartados, modificando suas características de modo que o resíduo possa retornar ao ciclo de produção.
- **Tratamento:** O tratamento dos RSU busca soluções e alternativas para minimizar os impactos dos resíduos descartados por não possuir mais finalidade ao consumidor. Compostagem e biodigestão são algumas das técnicas de tratamento.
- **Disposição Final:** A disposição final dos RSU consiste em distribuir os resíduos em locais adequados segundo projetos e estudos de viabilidade do meio, evitando riscos à saúde humana e ao meio ambiente.

A Figura 6 representa as práticas adotadas pela gestão gerenciamento de RSU em ordem decrescente de prioridades conforme a Lei Federal 12.305/2010, Art.9º da PNRS.

Figura 6 - Hierarquia da Gestão e Gerenciamento dos RSU.



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Com a geração crescente e significativa de resíduos sólidos nos últimos anos, são realizadas incessantes buscas por soluções para mitigar ou eliminar os impactos que esses resíduos causam no meio ambiente, na saúde humana e na economia (NASCIMENTO et al., 2015).

É de grande valia uma gestão e gerenciamento dos RSU eficientes e integrada para que diversos órgãos e entidades trabalhem em conjunto em prol da redução desses danos (RIBEIRO, 2018)

O incentivo de medidas como o princípio dos 3R 's, que são “Reduzir, Reutilizar e Reciclar”, faz com que a população tenha ciência da sua parcela de responsabilidade dentro dessa grande problemática (RIBEIRO, 2018).

Uma ação que diminuiria drasticamente a quantidade de RSU é a implementação da economia circular. A mesma se trata de um conjunto de estratégias visando a diminuição da extração da matéria-prima, a durabilidade dos produtos, a reparação e transformação dos produtos sem uso em matéria-prima (SILVA et al., 2020).

A economia circular é aplicada a todos os setores, tentando aumentar a produção com menos materiais e elementos naturais, incorporando os resíduos sólidos na cadeia de produção de novos produtos (ROQUE, 2018).

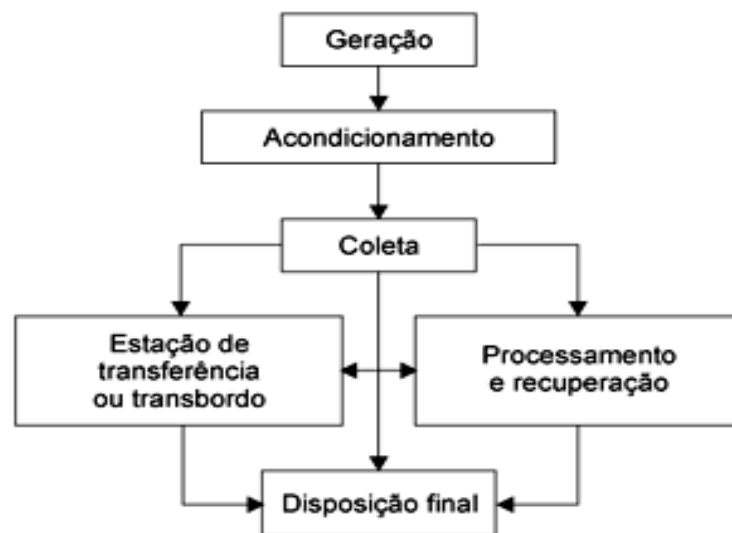
Essa prática reduziria a exploração dos recursos naturais, impactando desde o início da cadeia de geração dos RSU, na maneira de produção, no consumo consciente da população até a redução significativa dos RSU depositados no meio ambiente (SOARES, 2017).

3.9 ETAPAS DO GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Para um bom desenvolvimento do gerenciamento dos resíduos, todas as etapas e operações devem estar interconectadas, de modo que uma etapa esteja alinhada e condizente com as próximas, otimizando tempo e recursos (OLIVEIRA, 2019).

A Figura 7 apresenta as etapas do gerenciamento dos RSU que são a geração, acondicionamento, coleta, transferência ou transbordo, processamento e recuperação e disposição final, as quais também foram descritas subsequentemente.

Figura 7 - Etapas do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos.



Fonte: CUNHA, V., FILHO, J. V. C., 2002.

- **Geração:** A geração de resíduos é uma consequência da sobrevivência humana em meio a todo desenvolvimento econômico, industrial e de padrões/modelos de vida. A produção de resíduos é decorrente do consumo de produtos e serviços. Quanto maior a população e a concentração em

grandes centros, maior é a geração de resíduos sólidos urbanos (TIERNO, 2017).

- **Acondicionamento:** O acondicionamento é a preparação do resíduo para a coleta de maneira sanitariamente correta. O resíduo deve ser acondicionado de maneira apropriada, os recipientes mais comumente usados são os sacos plásticos, caçambas estacionárias e contêineres. Na etapa de acondicionamento ainda deve ser levado em conta o período e a frequência da coleta e a quantidade de resíduos gerada, a fim de facilitar o serviço da coleta, evitar acidentes e doenças e minimizar o impacto visual e maus odores (ROSSI, 2017).
- **Coleta:** A coleta é a etapa de recolher os resíduos gerados e acondicionados nas residências, comércios, prédios públicos entre outros, encaminhando mediante transporte para tratamento ou disposição final. A coleta é uma das etapas mais caras para o município pelo fato de ser feita de ponto a ponto, e com uma periodicidade semanal para evitar acúmulos (MARCO, 2014).
- **Transferência ou Transbordo:** As estações de transferência ou transbordo, são locais onde os veículos da coleta descarregam os resíduos em veículos com maior capacidade. Essas estações são utilizadas quando o ponto de disposição final dos resíduos se encontra a grandes distâncias da área de coleta (TIERNO, 2017).
- **Processamento e Recuperação:** A etapa de processamento e recuperação pode incluir processos para tratamento dos resíduos, reduzindo a quantidade ou o potencial de poluição dos RSU. Existem diversos tratamentos como alternativa para a recuperação dos resíduos, como a reciclagem, compostagem, digestão anaeróbica e processos térmicos (SOUZA, 2018).

A compostagem é o processo de decomposição biológica dos resíduos em condições controladas de temperatura, umidade e aerobiose. A compostagem gera um adubo orgânico que pode ser usado como fertilizante de solo (SIQUEIRA et al., 2015).

A digestão anaeróbia de RSU é um processo biológico no qual a matéria orgânica é convertida na ausência de oxigênio em uma mistura gasosa, composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono e que pode ser gerado o biogás, utilizado para geração de energia (VICTORINO, 2017).

O processo térmico mais utilizado é o de incineração, que degrada os resíduos queimando-os de maneira controlada, reduzindo consideravelmente o seu volume. Esse processo também contribui para a geração de energia (ROSSI, 2017).

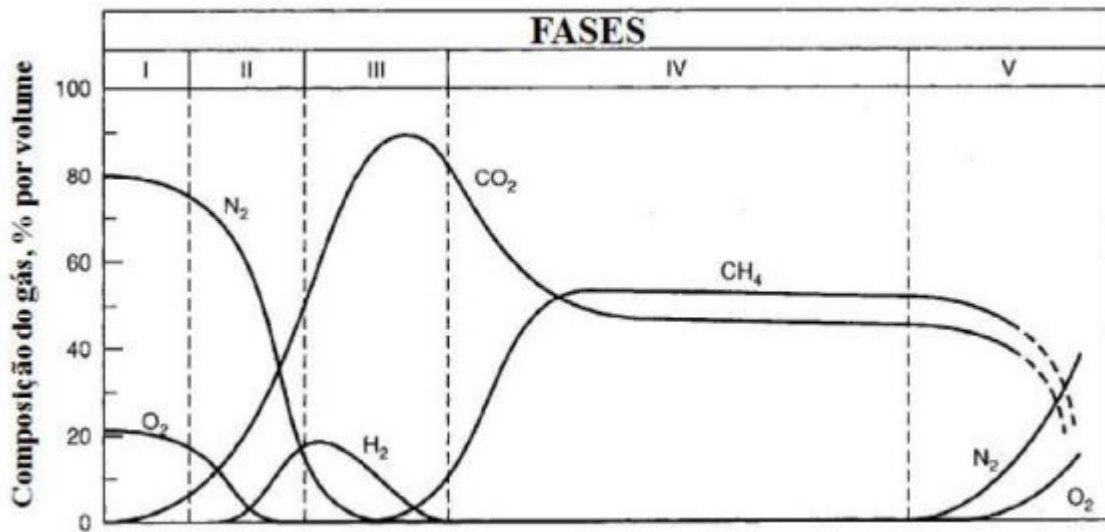
- **Disposição Final:** A disposição final é a última etapa do gerenciamento dos RSU. Nesta etapa todas as hipóteses de processamento e recuperação foram consideradas, e por inviabilidade de recuperação adicionais, os rejeitos são descartados. A destinação final considerada ambientalmente correta no Brasil são os aterros sanitários, local onde se tem o confinamento seguro em termos de proteção ao meio ambiente e à saúde humana. Respeitando normas ambientais e projetos de engenharia (OLIVEIRA, 2019).

3.10 GÁS DE ATERRO

O gás de aterro, ou biogás, resulta da digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos depositados nos aterros sanitários. O processo de formação do gás de aterro, compreende uma sequência de reações químicas e biológicas complexas que levam à formação de CH_4 (40-65%) e CO_2 (35-55%) com pequenas quantidades de sulfeto de hidrogênio (H_2S , 0,1-3%), umidade, e outros vestígios de contaminantes dependendo da matéria-prima (KAPOOR et al., 2020).

A Figura 8, de acordo com Purmessur e Surroop (2019), descreve as etapas de decomposição dos RSU:

Figura 8 - Fases de biodegradação dos RSU e geração de gases.



Fonte: Tchobanoglous e Kreith, 2002.

- **Fase I:** A primeira etapa do processo de decomposição biológica dos compostos orgânicos biodegradáveis começa quando os resíduos são dispostos no aterro sanitário. Nos momentos iniciais, essa decomposição acontece em condições aeróbias, uma vez que uma parcela de ar fica presa na massa de resíduos. A principal fonte de microrganismos atuantes nesse processo é o solo que é usado como material de cobertura no aterro.
- **Fase II:** Na segunda fase a concentração de oxigênio diminui bruscamente, e começam a se desenvolver condições anaeróbias. Nesse momento, nitratos e sulfatos presentes no substrato atuam como receptores de elétrons, sendo reduzidos a nitrogênio gasoso e sulfato de hidrogênio. Conforme o potencial de óxido-redução cai, essas reações são inibidas, favorecendo a formação de metano. Devido à produção de grandes quantidades de CO_2 , o pH também começa a diminuir.
- **Fase III:** A atividade bacteriana anaeróbia é intensificada, degradando as moléculas maiores, produzindo grandes quantidades de ácidos orgânicos e quantidades menores de gás hidrogênio. Primeiro ocorre a hidrólise enzimática de compostos orgânicos de grande massa molecular, transformando-os em compostos menores, apropriados para consumo interno por microrganismos.

A seguir vem a acidogênese, quando os compostos da primeira etapa são convertidos por bactérias em ácidos orgânicos de peso molecular intermediário. O principal composto formado nesse mecanismo é o ácido acético.

- **Fase IV:** A quarta fase começa com a formação do acetato devido ao consumo dos ácidos orgânicos gerados na terceira fase pelas bactérias anaeróbias. As condições neutras resultantes no aterro aumentam o crescimento de bactérias produtoras de metano. Um volume substancial de gás de aterro compreendendo essencialmente metano e dióxido de carbono é formado devido à degradação anaeróbica de resíduos orgânicos. Gases traços, nomeadamente sulfeto de hidrogênio, óxido nitroso e monóxido de carbono também podem estar presentes.
- **Fase V:** Conforme a matéria orgânica inicialmente disponível é convertida em metano e gás carbônico, outros materiais até então indisponíveis pelos microrganismos, agora migram e começam a ser degradados. Então, a decomposição continua, porém a produção de metano é reduzida, pois os nutrientes restantes são de lenta degradação.

A Tabela 2 mostra a composição do gás de aterro, apontando as concentrações dos constituintes e a combustibilidade dos mesmos.

Tabela 2 - Representação da Composição do Biogás.

| Constituinte | Concentração (v / v) | Combustibilidade |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Metano | 40-65% | Combustível |
| Dióxido de Carbono | 35-55% | Não Combustível |
| Umidade | 1-5% | Não Combustível |
| Azoto | 0-5% | Não Combustível |
| Hidrogênio | Traços | Combustível |
| Sulfureto de Hidrogênio | 0,1-3% | Combustível |
| Oxigênio | <2% | Não Combustível |
| Gases Traço | <2% | |
| Amônia | 0-500ppm | |

Fonte: Adaptado de KAPOOR et al., 2020.

3.11 FATORES QUE INFLUENCIAM A FORMAÇÃO DE BIOGÁS DE ATERRO

A geração de biogás em um aterro sanitário depende de vários fatores, como o tipo e a composição dos resíduos, teor de umidade, nutrientes, densidade, temperatura e pH, concentração de oxigênio no aterro, idade do resíduo, entre outros (FU et al., 2020). Esses fatores são, assim, caracterizados:

- **Composição de resíduos:** A composição dos resíduos sólidos, ou seja, sua composição gravimétrica e química, influencia diretamente no potencial de produção de biogás. Resíduos orgânicos quando decompostos geram maior quantidade de biogás do que resíduos não biodegradáveis, tais como o vidro, plásticos, os metais entre outros. Quanto mais facilmente é decomposta a fração orgânica do resíduo, mais acelerada será a taxa de produção de gases no aterro (PIÑAS et al., 2016).
- **Nutrientes:** Alguns nutrientes fazem com que a produção de biogás aumente devido ao desenvolvimento das bactérias, são eles potássio, sódio, magnésio e o cálcio. Porém, o excesso desses nutrientes também pode acabar sendo prejudicial às bactérias, diminuindo assim o volume de gás gerado (STOLECKA et al., 2021).

- **Teor de umidade:** O teor de umidade é um dos fatores mais importantes para a produção de biogás em aterro sanitário. A umidade serve para transportar os nutrientes e as bactérias pelo aterro. A quantidade máxima de gás é produzida quando o teor de umidade é na faixa de 40%. Esse teor de umidade tende a mudar ao longo do tempo em aterros convencionais (PURMESSUR et al., 2019).
- **Temperatura:** As condições de temperatura influenciam nos tipos de bactérias que irão predominar no aterro e, conseqüentemente, no nível da produção de gás. Bactérias mesofílicas preferem temperaturas em torno de 30 °C a 35 °C, bactérias termofílicas são adeptas de temperaturas mais altas como 45 °C a 65 °C. As bactérias termofílicas produzem maiores taxas de geração de gás de aterro, porém, a maioria dos aterros têm temperaturas mais favoráveis às mesofílicas. (MARQUES JUNIOR, 2020). Após 45 dias de disposição dos resíduos geralmente são encontradas as maiores temperaturas, por conta da atividade aeróbica das bactérias. Já na fase anaeróbia a temperatura do aterro diminui. Os resíduos a uma profundidade de 15 m ou mais não sofrem a influência da temperatura externa. As elevadas temperaturas o gás dentro de um aterro são o resultado da atividade biológica. As temperaturas típicas do gás produzido num aterro variam entre 30 °C e 60°C (FU et al., 2020).
- **pH:** A faixa de pH ótimo para a maioria das bactérias anaeróbias é 6,7 a 7,5 ou próximo do neutro, 7. Dentro da faixa ótima de pH, a metanogênese aumenta para uma taxa elevada de tal modo que a produção de metano é maximizada. Fora da faixa ótima – um pH abaixo de 6 ou acima de 8 – a produção de gás fica limitada. A maioria dos aterros tende ter ambientes levemente ácidos. Através do pH é possível acompanhar o processo evolutivo de degradação da matéria orgânica (MARQUES JUNIOR, 2020).
- **Idade dos Resíduos:** A geração de biogás em um aterro possui duas variáveis dependentes do tempo: tempo de atraso e tempo de conversão. O tempo de atraso é o período da disposição dos resíduos até o início da geração. O tempo de conversão é o período da disposição dos resíduos até o final da geração de

biogás. Maior quantidade de biogás é gerada quando os resíduos sob ação das bactérias e das reações químicas têm menos de 10 anos enterrados. O pico de produção do biogás ocorre entre 5 e 7 anos (PURMESSUR et al., 2019).

3.12 IMPUREZAS DO BIOGÁS

O biogás gerado em aterro sanitário é principalmente composto de CH₄ (40-65%) e CO₂ (35-55%) com pequenas quantidades de sulfeto de hidrogênio (H₂S) (0,1-3%) siloxanos, amônia, umidade, e outros vestígios de contaminantes pertencentes a diferentes famílias de compostos. Dióxido de carbono e impurezas precisam ser removidas, pois podem levar a uma diminuição no valor calorífico, corrosão dos equipamentos e emissões prejudiciais (KAPOOR, et al., 2020).

A maior família de impurezas são os compostos orgânicos voláteis (VOCs), que são compostos com temperatura e pressão, respectivamente, de 20 °C e 0,01 kPa. Os compostos orgânicos são formados pelo elemento carbono e um ou mais elementos como o hidrogênio, halogênios, oxigênio, enxofre, fósforo, silício ou nitrogênio (WASAJJA et al., 2020).

A concentração de umidade no biogás geralmente é de 5% a 10%. A umidade é considerada uma das impurezas do biogás, pois, reduz a viabilidade do gás, além de danificar os equipamentos por corrosão devido produção de ácidos quando em contato com H₂S e compostos halogenados (RASAPOOR et al., 2020).

A concentração de sulfeto de hidrogênio (H₂S) no biogás varia com a matéria-prima de 0 a 10.000 ppm. O sulfeto de hidrogênio é um gás tóxico e corrosivo, que provoca danos significativos para os tubos, equipamentos e instrumentos, o que torna a sua remoção obrigatória para quase todas as aplicações de biogás, porém, para cada aplicação há diferentes limites de tolerância para o H₂S (SEMAN et al., 2019).

3.12.1 Remoção das impurezas do biogás

As impurezas do biogás corroem e desgastam mecanicamente os equipamentos, como também causam emissões de gases contaminantes e poluentes (KAPOOR, et al., 2020).

O biogás precisa passar por processos de limpeza para remover essas

impurezas indesejáveis para sua posterior aplicação. Geração de eletricidade, calor e até mesmo combustível gasoso em motores de combustão interna. Esses processos de limpeza são constituídos por diversas técnicas, voltadas para diferentes finalidades, com diferentes metodologias, custos e especificações de remoção (WASAJJA et al., 2020).

THIRUSELVI et al., 2020, descreve algumas das técnicas mais usadas para remoção de impurezas, e enriquecimento do biogás, sendo elas:

- **Absorção química:** A absorção química é a reação química do absorvente com as moléculas de CO_2 , resultando na remoção do CO_2 do biogás. Os grupos amina nesses compostos reagem com o CO_2 para formar carbamatos que serão decompostos através do aquecimento. A capacidade de absorção das alcanolaminas difere de um composto para outro e também do composto único mono-di-metil etanolamina (MDEA) para a mistura de compostos. A amônia (sem solução aquosa) é o absorvente que apresenta maior corrosividade e menor necessidade de energia quando comparada com mono-etanolamina (MEA) e mono-di-metil etanolamina (MDEA). A lavagem química com soluções alcalinas como Na, K, NH_3 , CaOH, NaOH absorve mais CO_2 do que as soluções de amina. Na comparação entre a depuração física e química, o processo químico mostra uma absorção mais eficiente de CO_2 . Porém, a desvantagem da quimissorção está na regeneração do solvente, uma vez que prossegue com a quebra das ligações químicas entre as moléculas absorventes e de CO_2 , e necessita de alta temperatura de entrada (THIRUSELVI et al., 2020).
- **Adsorção em superfície sólida:** A adsorção é um fenômeno físico que envolve a fixação de adsorbato (moléculas gasosas) em um adsorvente (superfície sólida) devido às forças de *Van Der Waals*. Comercialmente, um adsorvente nobre deve satisfazer pelo menos uma das seguintes categorias: (i) a seletividade de CO_2 para o adsorvente deve ser comparativamente maior quando comparado com CH_4 . Os adsorventes baseados na diferença da seletividade dos constituintes são denominados adsorventes baseados no equilíbrio; (ii) uma diferença considerável nos diâmetros cinéticos de vários constituintes desempenha um papel vital. O diâmetro cinético do dióxido de

carbono e do metano foi de 3,4 Å e 3,8 Å, respectivamente. O tamanho dos poros do adsorvente deve ser adequado apenas ao tamanho das partículas a serem adsorvidas. Os adsorventes usados com base na diferença das restrições de difusão dos constituintes são denominados adsorventes de base cinética. O adsorvente cinético usado de forma mais eficiente para a adsorção de dióxido de carbono foram as peneiras moleculares de carbono - CMS3K; (iii) Alta temperatura e pressão são os parâmetros governantes de adsorção e, portanto, essa pode ser categorizada como adsorção por oscilação de pressão (PSA) e Adsorção por oscilação de temperatura (TSA) (THIRUSELVI et al., 2020)

- **Separação por membranas:** A separação de vários constituintes gasosos pelo processo de permeação seletiva usando membranas poliméricas semipermeáveis envolve a solubilização de componentes gasosos em um lado da membrana seguido pela difusão de outros constituintes através da membrana com base no gradiente de concentração. Com base no material da membrana e no tipo de separação, as membranas são categorizadas como membranas poliméricas de vidro e poliacetilenos substituídos por borracha ou vidro. As membranas poliméricas (vidro) envolvem a separação com base no tamanho molecular, enquanto as membranas substituídas com borracha envolvem a separação com base na solubilidade dos constituintes na membrana polimérica. As membranas poliméricas vítreas não são eficientes com o tamanho aumentado das moléculas. As membranas poliméricas usadas comercialmente incluem acetato de celulose, poliimida, poliamidas, polissulfona, policarbonato e polieterimida. A separação de vários constituintes usando membranas envolve simplicidade de operação, utilização otimizada do espaço, menor custo de manutenção, menor investimento de capital quando comparado com outras técnicas de enriquecimento de biogás. Por outro lado, apresenta algumas limitações como a quebra da membrana devido ao gradiente de pressão (THIRUSELVI et al., 2020).
- **Separação Criogênica:** Processo dependente da temperatura de condensação e destilação de vários gases. Com base na redução da temperatura, a separação do metano e outros gases do biogás bruto é

alcançada. As vantagens deste processo incluem (i) a não exigência de qualquer meio ou produto químico especial para purificação de biogás; (ii) compressão externa para biogás atualizado não é necessária; (iii) o biogás obtido pode ser usado como uma fonte na produção de CO_2 sólido. As limitações desse processo são a exigência de alta pressão em baixa temperatura, isolamento adequado para proteger o biogás do calor circundante, alto custo operacional, entupimento, congelamento de impurezas (THIRUSELVI et al., 2020).

3.13 EXTRAÇÃO DO BIOGÁS DE ATERROS

A extração/coleta dos gases de aterro é feita com o intuito de reduzir a pressão interna causada no maciço dos resíduos, permitindo assim uma melhor acomodação das camadas, aumentando a estabilidade do aterro e reduzindo riscos de acidentes como explosões. A extração dos gases também viabiliza o aproveitamento em diversas aplicações como na geração de energia elétrica, como combustível, para aquecimento residencial, entre outras (SANTOS, et al., 2019).

Os gases de aterro podem ser extraídos através de sistemas de captação de gases por poços verticais e/ou drenos horizontais interligados. Os poços e drenos são tubos geralmente feitos de cloreto de polivinila (PVC), concreto ou polietileno (PEAD) (HALVORSEN, et al., 2019).

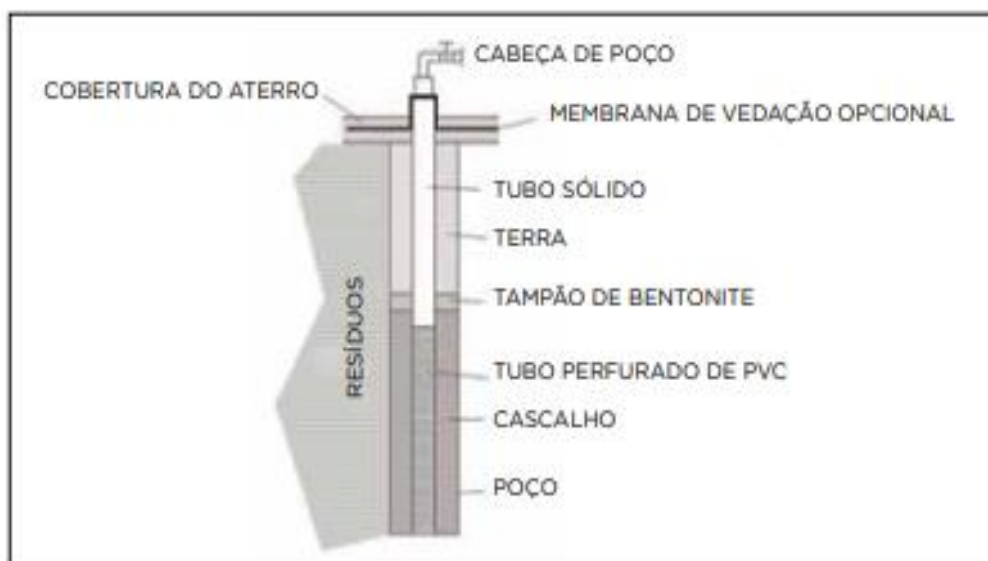
- **Sistema de poços verticais:** Os poços verticais normalmente são instalados em locais que pararam de receber resíduos ou nos quais esses resíduos não serão depositados por mais de um ano. A implantação desses drenos em locais que estão recebendo resíduos acarretará maiores manutenções. Um poço vertical é composto de uma tubulação do poço com perfurações ou fendas na parte inferior do tubo, preenchimento de cascalho limpo, preenchimento de solo, um tampão de bentonita e uma cabeça de poço (TOUZE-FOLTZ, et al., 2020).

Os tubos geralmente são de PVC por serem mais resistentes ao calor e a pressão. A profundidade dos poços depende dos resíduos e da quantidade recebida, normalmente termina em 3-5 metros acima da base da massa de

resíduos. Os tubos verticais variam de 20-90 cm de diâmetro. O local de inserção dos tubos, bem como seus comprimentos e espaçamentos dependem de diversos parâmetros específicos de cada local como a profundidade de resíduos, profundidade do poço, níveis de chorume, compactação dos resíduos, o uso final desses gases coletados, entre outros (FENG, et al., 2017).

A Figura 9 apresenta um modelo de um poço vertical e seus componentes, para a extração do gás de aterro.

Figura 9 - Representação de um sistema de extração de gás vertical.

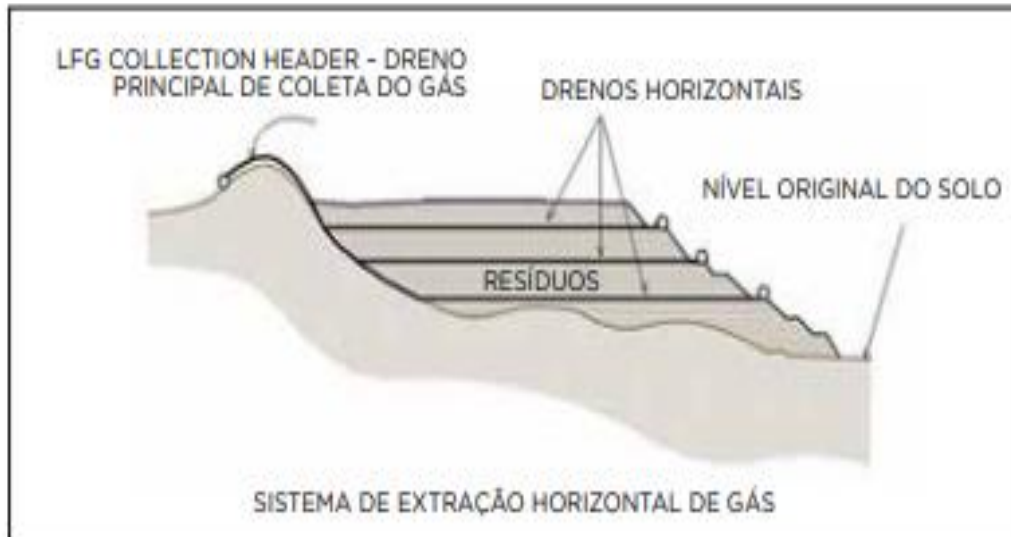


Fonte: Geração Elétrica a partir do Biogás de Resíduos Sólidos Urbanos, 2019.

- **Sistema de poços horizontais:** Os poços de extração horizontais podem ser instalados enquanto o aterro ainda está recebendo os resíduos, ou quando se quer coletar o gás em uma área antes do fechamento da cédula. Poços horizontais são colocados em um abrigo nas camadas de resíduos. Esse abrigo é preenchido com cascalho ou outro material para proteger as tubulações, e o tubo é inserido no centro desse abrigo. Um tecido geotêxtil é recomendado no topo da vala para reduzir o entupimento dos tubos pelo resíduo depositado acima. Os tubos horizontais têm espaçamento comum de 30-40 metros. O tubo perfurado dentro da trincheira é normalmente de 10-20 cm em diâmetro (CARVALHO, et al., 2019).

A Figura 10 apresenta o modelo de um poço horizontal utilizado para extração de gás de aterro.

Figura 10 - Representação de um sistema de extração de gás de aterro horizontal.



Fonte: Geração Elétrica a partir do Biogás de Resíduos Sólidos Urbanos, 2019.

3.14 CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA

Atualmente, há diversas tecnologias para se fazer a conversão do biogás em energia. Essa conversão se trata de transformar energia química em energia mecânica, térmica ou elétrica a partir de uma combustão controlada (MIRANDA et al., 2017).

As principais tecnologias empregadas para a conversão do biogás em energia são os motores de combustão interna, as turbinas e as microturbinas a gás (SANTOS, et al., 2019). Essas tecnologias são, assim, caracterizadas:

- **Motores de Combustão Interna:** Os motores de combustão interna, também conhecidos como motores de Ciclo Otto, podem operar com diferentes tipos de combustíveis, sendo que o fluido de trabalho são os produtos da combustão da mistura ar-combustível, e a câmara de combustão e o próprio processo de combustão estão integrados ao funcionamento geral do motor (SANTOS, et al., 2019). Os motores de combustão interna funcionam em 4 tempos com funções específicas, sendo elas, a admissão, compressão, combustão e exaustão. Sua potência é de 30 kW a 20 MW, tendo um rendimento variável de 30% a 40%

(MIRANDA et al., 2017). Essa tecnologia é muito usada por ser um processo prático e apresentar alta durabilidade. Dentre as suas vantagens, o motor a combustão interna apresenta um baixo custo de instalação e grande eficiência quando comparado com outras tecnologias de conversão apresentadas pelo mercado (LIMA et al., 2018).

- **Turbinas a Gás:** Existem dois tipos de turbinas a gás, sendo elas ciclo aberto e ciclo fechado. Nas turbinas a gás com ciclo aberto, não há adição de calor com o ambiente externo, fazendo com que haja altas temperaturas do ar. Nas turbinas a gás com ciclo fechado, os gases após deixarem a turbina passam por um trocador de calor, onde são resfriados e entram novamente no compressor (RAFIEE et al., 2021). Essas turbinas são mais utilizadas em aterros de grande porte. As turbinas a gás são tecnologias inovadoras, isso acarreta preço comercial e de manutenção mais altos. A potência das turbinas varia entre 500 kW a 150 MW com um rendimento entre 20 e 30%. Apesar de custos mais altos que os motores de combustão interna, as turbinas quando operadas em sistemas de cogeração (eletricidade e calor), apresentam uma eficiência global de conversão considerável (LIMA et al., 2018).
- **Microturbinas a Gás:** As microturbinas a gás são mais utilizadas em aterros de pequeno porte, com potência entre 30 kW a 100 kW. As microturbinas têm a vantagem da possibilidade de ser transferida de local caso necessário por serem instalações pequenas. Ainda por conta dessa dimensão pequenas, as turbinas podem ser instaladas em grupos, aumentando assim a potência total instalada. Por ter menor potência, as microturbinas acabam tendo um consumo de energia elevado de kWh produzido (MIRANDA et al., 2017).

3.15 MODELAGENS DE ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS

Inúmeros modelos matemáticos e computacionais foram desenvolvidos para prever a geração de biogás em aterros sanitários. Essas modelagens também são usadas para dimensionar o sistema de coleta do biogás, para geração de energia e para regulamentações das emissões dos gases. Esses modelos são classificados em

ordem zero, primeira ordem, segunda ordem e multifásico (ESPÍRITU, 2019). Esses modelos são, assim, caracterizados:

- **Modelo de ordem zero:** Os modelos de ordem zero assumem que a geração de biogás é constante no tempo. Ou seja, a taxa de produção de biogás é independente da quantidade de resíduos que o aterro recebe e do volume de biogás que já foi produzido (LATTANZI et al., 2019).
- **Modelo de primeira ordem:** As modelagens de primeira ordem assumem que a geração de biogás a partir de uma dada quantidade de resíduos, decai exponencialmente com o tempo. Os modelos de primeira ordem incluíram na modelagem variáveis que consideram o tempo de degradação dos resíduos sólidos urbanos, levando em conta a degradação cinética de primeira ordem (os microrganismos permanecem constantes ao longo da decomposição) (LATTANZI et al., 2019).
- **Modelo de segunda ordem:** Os modelos de segunda ordem tratam de previsões da geração de metano a partir de fundamentações químicas e microbiológicas da síntese do metano. As modelagens envolvem as reações químicas, as populações de bactérias e a disponibilidade de substratos e nutrientes para todo o processo de geração de biogás acontecer (LIMA et al., 2018).
- **Modelo Multifásico:** Os modelos multifásicos obtêm as previsões de geração de metano a partir da análise de degradação das frações de RSU, sendo classificadas como: prontamente degradáveis, moderadamente degradáveis, lentamente degradáveis e, inertes. A modelagem multifásica usa dos modelos de primeira ordem, cujo objetivo é expressar a geração de metano proveniente de diferentes frações de resíduos (ESPÍRITU, 2019).

Os modelos de previsão da geração de biogás mais utilizados nos aterros sanitários são os de primeira ordem, por permitirem ajustes nas variáveis conforme particularidades do local estudado, pela simplicidade nos cálculos e por ter virado uma modelagem padrão se tratando da produção de biogás (BARROS et al., 2017). Os

modelos de primeira ordem mais empregados e difundidos são o modelo “LandGEM” e o modelo “Biogás”.

O modelo LandGEM (*Landfill Air Emissions Model*) ou Modelo de Emissões Atmosféricas de Aterros é um software criado pela USEPA (*United States Environmental Protection Agency*), do qual estima as emissões de CH₄, CO₂, compostos orgânicos não-metanogênicos e poluentes perigosos a partir de aterros de resíduos sólidos urbanos (EPA, 2005).

O LandGEM utiliza um modelo matemático baseado em uma equação de decaimento de primeira ordem para estimar as emissões de gases de aterro. Os dados de entrada para a simulação de emissões podem ser específicos do aterro em estudo, ou usar os valores padrões já determinados (EPA, 2005).

As entradas básicas do software são as datas de operação do aterro a e quantidade de resíduos que está disposta no local. Com isso, o programa já entende que o volume de gás de aterro a partir dos RSU atinge seu pico depois de um certo período, e que a geração de gases começa a partir de um ano do qual foram depositados os RSU (EPA, 2005).

A Equação 1 fundamenta o LandGEM.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k * L_0 * \left(\frac{M_i}{10}\right) * e^{-kt_{ij}} \quad (1)$$

onde:

Q_{CH_4} = geração anual de metano no ano do cálculo (m³/ano);

i = incremento de tempo de um ano;

n = (ano de cálculo) – (ano de início de funcionamento do aterro);

j = incremento de tempo de 0,1 ano;

k = taxa de geração de metano (1/ano);

L₀ = capacidade potencial de geração de metano (m³/Mg);

M_i = massa de aceitação de resíduos no ano “i” (Mg);

t_{i,j} = idade da seção “j” de massa de resíduos aceito no ano “i” (anos decimais, ex., 3.2 anos) (EPA, 2005).

O software “Biogás, geração e uso energético – aterros, versão 1.0” foi desenvolvido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB),

juntamente com o Governo Federal. O software visa auxiliar na previsão da geração e uso do biogás provindo de estações de tratamento anaeróbio de esgotos e de aterros sanitários. O Biogás é um modelo de simples aplicação com boa confiabilidade nos resultados. A estimativa da geração de metano se dá para cada porção de resíduo depositada no aterro. No primeiro ano de deposição dos resíduos ocorre o maior nível de geração, o qual irá reduzindo ao longo dos anos, variando sempre conforme cada aterro e resíduos dispostos (CETESB, 2006). Esse modelo é dado pela Equação 2:

$$Q_x = k * R_x * L_0 * e^{-k(x-t)} \quad (2)$$

onde:

Q_x = vazão de metano ($m^3 CH_4$ /ano);

k = constante de decaimento (1/ano);

L_0 = potencial de geração de metano (m^3/kg);

R_x = fluxo de resíduos (t/ano);

x = ano atual;

t = ano de deposição do resíduo.

Independente da ferramenta escolhida, é um desafio modelar a geração de metano exata que um aterro sanitário pode produzir, por conta das incertezas nos fatores influentes e suas variações, sendo os principais fatores a se determinar um valor apropriado aos parâmetros k e L_0 . Existem tabelas onde há sugestão de valores conforme o clima, temperatura, umidade local e dos resíduos, entre outros que ajudam na hora de minimizar os erros (MAJDINASAB et al., 2017).

3.16 MODELAGEM DE EMISSÕES EVITADAS DE CO_2eq

Para modelar as emissões de CO_2eq que são evitadas com a geração de biogás em aterros sanitários, comumente usa-se ferramentas disponíveis para aprovações em projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL. Nos projetos do MDL é possível a negociação de créditos de carbono com as modelagens efetuadas (SILVA, et al., 2020).

Nessas ferramentas de modelagem, calcula-se as emissões ou reduções de dióxido de carbono e a quantidade de metano que são gerados na decomposição dos RSU dispostos nos aterros sanitários (CETESB, 2006).

As modelagens das emissões de dióxido de carbono equivalentes, podem ser feitas, empregando-se as mesmas ferramentas matemáticas e dos softwares apresentados para estimar a geração de metano (CETESB, 2006).

3.17 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O GERENCIAMENTO DE RSU

A busca por maneiras mais eficientes de gerir com responsabilidades os RSU se dá constantemente, visto que o crescimento na geração de RSU aumenta em decorrência do aumento da população, do consumo e do descarte. Nas políticas públicas constam quais melhorias deveriam existir, quais regras o setor deve cumprir e quais são as responsabilidades de cada gestor (ARANTES, M., PEREIRA, R., 2021).

Nesse sentido, o Brasil possui uma política pública orientada para o gerenciamento dos RSU que é a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS). A lei 12.305 foi sancionada em 02 de agosto de 2010. O seu artigo 1º preconiza que:

“Art. 1º Esta Lei institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis.”

A PNRS estabelece as definições, os princípios, os instrumentos e as diretrizes necessárias para o país enfrentar os impactos causados pelos RSU, desde a sua geração até a disposição final adequada e consciente.

A lei ainda menciona que os resíduos gerados são de responsabilidade das pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, responsáveis, direta ou indiretamente, pela geração de resíduos sólidos.

Diversos objetivos são apresentados na PNRS, dentre eles estão: proteção da saúde pública e da qualidade ambiental; não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos; estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços; adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais e o incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial

voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético.

A lei não somente incentiva a não geração de resíduos como estimula o reaproveitamento dos resíduos para fins energéticos, o que inclui o uso do biogás gerado em aterros sanitários.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos norteia outros estados a criarem suas próprias leis em relação aos RSU conforme suas particularidades. Nesse contexto, em 2018 o governo de Santa Catarina institui a Política Estadual do Biogás, Lei N°17542 de 12 de julho de 2018. A Lei estadual tem como objeto,

“Art. 1º Fica instituída a Política Estadual do Biogás, que reúne um conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, ações, incentivos e fomentos adotados pelo Estado, isoladamente ou em regime de cooperação com a União, os Municípios ou particulares, com vistas à produção, à exploração, ao gerenciamento e à comercialização de biogás.”

A Lei do Biogás conta com sete objetivos, descritos em seu artigo 4º nos incisos seguintes:

- I - A proteção da saúde humana e animal e do meio ambiente para minimizar os impactos da produção e exploração comercial da proteína animal pela agroindústria do Estado;
- II - a adoção, o desenvolvimento e o aprimoramento de tecnologias limpas para minimizar impactos ambientais;
- III - a redução do volume de biomassa e a biodigestão de dejetos e rejeitos animais, urbanos e industriais;
- IV - o fomento ao aproveitamento de biomassa e biodigestão por meio do seu uso em escala industrial e comercial, como forma de geração de emprego e renda;
- V - a articulação entre as diferentes esferas do Poder Público e destas com o setor empresarial, com vistas à cooperação técnica e financeira para empreendimentos de exploração, comercialização e transporte de biogás;
- VI - a capacitação técnica continuada na área de biomassa, biodigestão, biogás e biometano; e
- VII - o estímulo à rotulagem ambiental e ao consumo e à produção sustentável de biomassa, biogás e biometano.

Ainda na Lei do Biogás, consta a criação de linhas de crédito e incentivos fiscais na cadeia produtiva do aproveitamento do biogás para a geração de energia.

Por fim, cabe ressaltar que na Política Estadual do Biogás é apresentado o Programa Catarinense do Biogás (SC-BIOGÁS), cujo objetivo é incentivar a geração e utilização do biogás, de seus derivados e subprodutos.

4 METODOLOGIA

4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na presente etapa do trabalho, realizou-se uma ampla pesquisa bibliográfica sobre o conceito, geração, produção, gestão e gerenciamento e o aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários. A pesquisa bibliográfica foi realizada, a fim de se adquirir conhecimento e domínio do conteúdo e do setor para o desenvolvimento do trabalho.

A pesquisa foi efetuada com base em artigos científicos, artigos de revisão, dissertações e teses sobre a temática. A busca dos conteúdos foi feita em plataformas digitais de pesquisas científicas como ScienceDirect, SciFinder e Google Scholar.

4.2 LOCAL DE ESTUDO

O local de estudo da presente pesquisa foi o aterro sanitário da CIRSURES, localizado no bairro Rio Carvão, no município de Urussanga, no sul do estado de Santa Catarina (Figura 11), com as coordenadas geográficas 28°29'54,08"S e 49°22'10,45"O. A cidade de Urussanga, onde se localiza o aterro, tem um clima subtropical úmido, com temperaturas que variam de 42,2 °C e -4,6 °C, com um média anual de 19,2 °C. O índice pluviométrico é de 1540 mm/ano e a umidade relativa do ar é em média 81,5% (Urussanga, 2021).

Figura 11 - Imagem do Aterro Sanitário da CIRSURES em Urussanga - SC.



Fonte: CIRSURES, 2021.

Inicialmente, o aterro foi criado como um consórcio público de direito privado, composto por sete municípios da região sul de Santa Catarina, sendo eles: Cocal do Sul, Lauro Müller, Morro da Fumaça, Orleans, Siderópolis, Treviso e Urussanga.

O aterro do CIRSURES iniciou as operações em março de 2004 e em 2010 foi realizada uma alteração estatutária no consórcio. A mudança de caráter jurídico do consórcio se deu em função da lei 11.107 de 06 de abril de 2005 (lei dos consórcios). Assim, de 2010 em diante, o CIRSURES passou a ser um consórcio público de direito público.

Em agosto de 2015, foi implantada a coleta seletiva nos sete municípios consorciados.

Atualmente, o CIRSURES atende mais de 100 mil habitantes e, anualmente, são dispostas mais 13.000 mil toneladas de resíduos. Os resíduos gerados pelos municípios integrantes do consórcio são encaminhados, primeiramente, para triagem, para aproveitamento dos resíduos reciclados pela Cooperativa de catadores do Rio América. Após esta etapa, os rejeitos são encaminhados para as células de disposição para a destinação final no aterro sanitário.

4.3 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE METANO E ENERGIA ELÉTRICA

Para estimar o potencial de produção de biogás a partir da biodegradação dos resíduos e, conseqüentemente, o potencial de geração de energia elétrica na conversão térmica desse gás, utilizou-se do modelo de decaimento de primeira ordem.

O aterro sanitário tem previsão de abrir uma nova célula para receber os RSU em agosto de 2021. Para realizar a estimativa foi projetada uma vida útil de vinte anos, ou seja, a previsão de encerramento da célula estudada é em 2041.

Todos os cálculos e estimativas apresentados neste trabalho foram executados com base para essa nova célula.

Esse modelo de previsão de geração de metano foi escolhido por permitir ajustes nas variáveis de entrada, conforme particularidades da região e do aterro estudados, por apresentar confiabilidade nos resultados e facilidade nos cálculos.

Os cálculos foram feitos com o auxílio de dois softwares: o Biogás, desenvolvido pela CETESB em parceria com o Governo Federal, e o software Microsoft Excel que é um editor de planilhas. A Figura 12 mostra as imagens ilustrativas dos dois softwares utilizados.

Figura 12 - Logotipo do software Biogás e logotipo do software Excel.



Fonte: CETESB e EXCEL, 2021.

A decisão pelo uso das duas ferramentas teve o intuito de diminuir a chance de possíveis erros de cálculos. Em outras palavras, buscou-se garantir uma maior precisão nos resultados obtidos.

Nos dois softwares, foi aplicada a Equação 2 já apresentada na Referência Bibliográfica, Seção 3.15.

O valor de k é uma função do teor de umidade residual, disponibilidade de nutrientes para bactérias geradoras de metano, pH e temperatura. A taxa de decaimento de resíduos tende a ser mais elevada em locais de climas mais úmidos, e atingem níveis máximos em condições de melhoria da umidade. As características

do clima são, frequentemente, utilizadas como substituto da umidade dos resíduos, devido à falta de informação sobre as condições de umidade dentro de um aterro (EPA, 2020).

O potencial de produção de metano descreve a quantidade total de gás metano potencialmente produzido por uma tonelada métrica de resíduos, à medida que se decompõe. O valor para esse potencial depende, quase que inteiramente, do tipo de resíduos presentes no aterro. Quanto maior for o teor orgânico dos resíduos, maior será seu valor. Contudo, devido à falta de informações a respeito das características dos resíduos, o clima também é usado para definição do potencial de produção de metano, conforme apresentado na Tabela 3 (EPA, 2020; CETESB, 2006).

O município de Urussanga está localizado em uma região classificada como clima subtropical úmido, assim, foram considerados nos cálculos o valor para constante de decaimento k de 0,22 por ano, e potencial de produção de metano L_0 de 0,16 m^3/kg , sendo esses, os valores intermediários sugeridos no manual do software Biogás para climas mais úmidos, conforme apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores sugeridos de L_0 e k .

| Variável | variação | valores sugeridos | | |
|------------------------------|-------------|-------------------|------------------------|-------------|
| | | clima úmido | clima de umidade média | clima seco |
| L_0 [m^3CH_4/kg_{RSD}] | 0 – 0,312 | 0,14 – 0,18 | 0,14 – 0,18 | 0,14 – 0,18 |
| k [1/ano] | 0,003 – 0,4 | 0,10 – 0,35 | 0,05 – 0,15 | 0,02 – 0,10 |

Fonte: CETESB, 2006.

A estimativa do valor do fluxo de resíduos R_x , foi realizada com base no crescimento populacional de 1,64% na região de estudo (IBGE, 2020). Com a porcentagem de crescimento populacional da região e dos valores depositados mensalmente no aterro sanitário da CIRSURES no ano de 2020, pode-se projetar o fluxo de resíduos que serão dispostos nos próximos anos, sendo considerada que a geração de resíduos per capita não se altera ao longo do tempo.

Vale ressaltar que existem algumas fontes de incerteza nas pesquisas e modelagens relacionadas à geração de biogás em aterros sanitários, podendo afetar os resultados finais. Diversos fatores podem afetar os resultados finais de geração, dependendo das premissas e abordagens metodológicas aplicadas no desenvolvimento. Os parâmetros que são mais sensíveis e que podem afetar

significativamente os valores finais são k e L_0 , por, constantemente, sofrerem variações (NIKKHAH et al., 2018).

A definição dos valores escolhidos para esses parâmetros tomou como base as tabelas disponíveis no software Biogás, levando-se em consideração as particularidades da região, do clima e dos resíduos recebidos.

Com os valores dessas variáveis definidos, foi possível aplicar a Equação (2) e estimar a vazão de biogás anual gerada pelo aterro em estudo.

A partir da vazão de metano foi possível estimar a potência disponível anualmente. Para o cálculo da potência utilizou-se a Equação 3, disponível no Manual do software Biogás.

$$P_x = \frac{Q_x * P_{c(\text{metano})}}{31536000} * E_c * \frac{k}{1000} \quad (3)$$

onde:

P_x = Potência disponível a cada ano (kW);

Q_x = Vazão de metano a cada ano ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ano}$);

$P_{c(\text{metano})}$ = Poder calorífico do metano ($\text{J}/\text{m}^3\text{CH}_4$);

E_c = Eficiência de coleta de gases (%);

31.536.000s = Quantidade de segundos em um ano (s/ano);

$k = 1$ (adimensional).

Segundo o Manual do Biogás, a disponibilidade de gás no aterro implica disponibilidade de energia. A estimativa da energia disponível foi feita a partir da Equação 4.

$$E_{\text{disponível}} = P_x * (365 * 24) \quad (4)$$

onde:

$E_{\text{disponível}}$ = Energia disponível (kWh);

P_x = Potência disponível (kW);

365 = dias por ano (dia/ano);

24 = horas por dia (h/dia).

Com as equações e softwares apresentados acima foram estimados a geração de metano pelo aterro, a potência disponível e a energia elétrica teórica disponível.

4.4 ESTIMATIVA DE EMISSÕES EVITADAS DE CO_2eq

A estimativa de emissões evitadas de CO_2eq foi feita a partir dos resultados obtidos nos softwares em relação à vazão de metano. Embora o Software Biogás apresente o aquecimento global causado pelo metano 21 vezes maior quando comparado com o dióxido de carbono, neste trabalho foram utilizadas fontes mais atuais de dados, onde consideram a equivalência de 28 vezes (GONÇALVES et al., 2019).

A equivalência dos gases se dá pela Equação 5.

$$CO_2eq = Q_{xCH_4} * 28 * \rho_{CH_4} \quad (5)$$

onde:

CO_2eq = Dióxido de carbono equivalente (ton/ano);

Q_{xCH_4} = Vazão de metano (m^3CH_4 /ano);

28 = potencial de aquecimento global comparado com o dióxido de carbono;

ρ_{CH_4} = Massa específica do metano (kg/m^3).

4.5 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RSU

Para cobrir o tópico que tratou das políticas públicas, foram realizados estudos em documentos públicos, bem como artigos científicos, considerando o objetivo específico "geração de subsídios para os gestores do consórcio de municípios", focou-se na Política Nacional de Resíduos Sólidos e na Política Estadual de Biogás.

As discussões sobre o tema foram apresentadas na Seção 5.5 do presente estudo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ESTIMATIVA DE RSU NO ATERRO SANITÁRIO DA CIRSURES

Como já mencionado, o aterro sanitário da CIRSURES irá abrir uma nova célula em agosto de 2021. Portanto, todas as estimativas e cálculos foram feitos com base nos resíduos que serão depositados no aterro de agosto de 2021 a 2041, quando se encerrariam as atividades nessa célula. No presente estudo, foi estimado que, vinte anos após o fechamento da célula, a mesma irá continuar gerando biogás e que, somente, em 2061 os gases emitidos pela decomposição dos RSU chegará próximo de zero.

Para estimar a quantidade de RSU recebidos pelo aterro nesses 20 anos de atividade da célula, utilizou-se da Tabela 4 disponibilizada pela CIRSURES, que indica as toneladas de resíduos recebidas pelo aterro mês a mês dos municípios integrantes do consórcio no ano de 2020.

Com os dados de 2020 e a porcentagem de crescimento populacional da região, obteve-se a projeção da quantidade de resíduos que o aterro receberá, conforme também apresentado na Tabela 4.

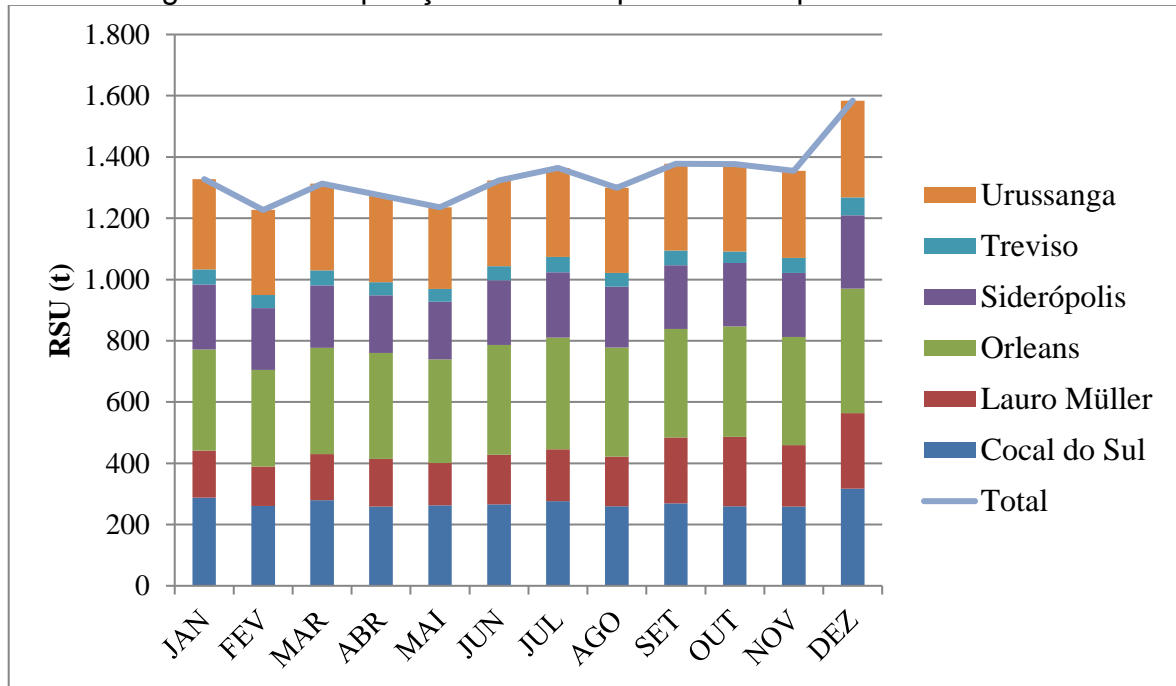
Tabela 4 - RSU dispostos no aterro sanitário da CIRSURES no ano de 2020.

| MUNICÍPIO | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | Total |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| Cocal do Sul | 288,27 | 260,74 | 279,33 | 259,025 | 262,73 | 265,6 | 276,57 | 260,21 | 269,3 | 259,91 | 258,37 | 316,91 | 3.256,965 |
| Lauro Müller | 153,42 | 128,34 | 150,85 | 155,65 | 138,42 | 161,92 | 168,7 | 161,45 | 215,19 | 227,06 | 200,87 | 247,24 | 2.109,11 |
| Orleans | 330,26 | 315,99 | 346,66 | 345,16 | 338,45 | 358,8 | 365,43 | 356,63 | 354,16 | 360,14 | 353,31 | 406,63 | 4.231,62 |
| Siderópolis | 212 | 201,2 | 203,67 | 188,75 | 187,63 | 210,84 | 212,77 | 198,1 | 208,12 | 207,05 | 209,49 | 238,36 | 2.477,98 |
| Treviso | 49,21 | 43,18 | 49,65 | 42,48 | 42,12 | 45,81 | 49,86 | 44,86 | 47,4 | 37,89 | 48,81 | 59,4 | 560,67 |
| Urussanga | 295,05 | 277,47 | 282,53 | 283,51 | 266,45 | 280,97 | 291,4 | 278,75 | 283,64 | 284,47 | 284,19 | 315,69 | 3.424,12 |
| Total (ton) | 1.328,21 | 1.226,92 | 1.312,69 | 1.274,575 | 1.235,8 | 1.323,94 | 1.364,73 | 1.300 | 1.377,81 | 1.376,52 | 1.355,04 | 1.584,23 | 16.060,465 |

Fonte: CIRSURES, 2021.

A Figura 13 apresenta a geração e deposição de RSU de cada participante do consórcio no ano de 2020, no aterro em Urussanga. Os resultados permitem observar que é notória uma maior participação na deposição de resíduos pelas cidades com maior número de habitantes, sendo elas, Urussanga, Orleans e Cocal do Sul.

Figura 13 – Disposição dos RSU pelos municípios do consórcio.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A Tabela 5 apresenta a projeção de RSU que seriam dispostos no aterro sanitário nos 20 anos de operação da célula, iniciando no ano de 2021 e encerrando em 2041. Os valores apresentados foram calculados com base no crescimento populacional da região, correlacionado a geração de resíduos *per capita*.

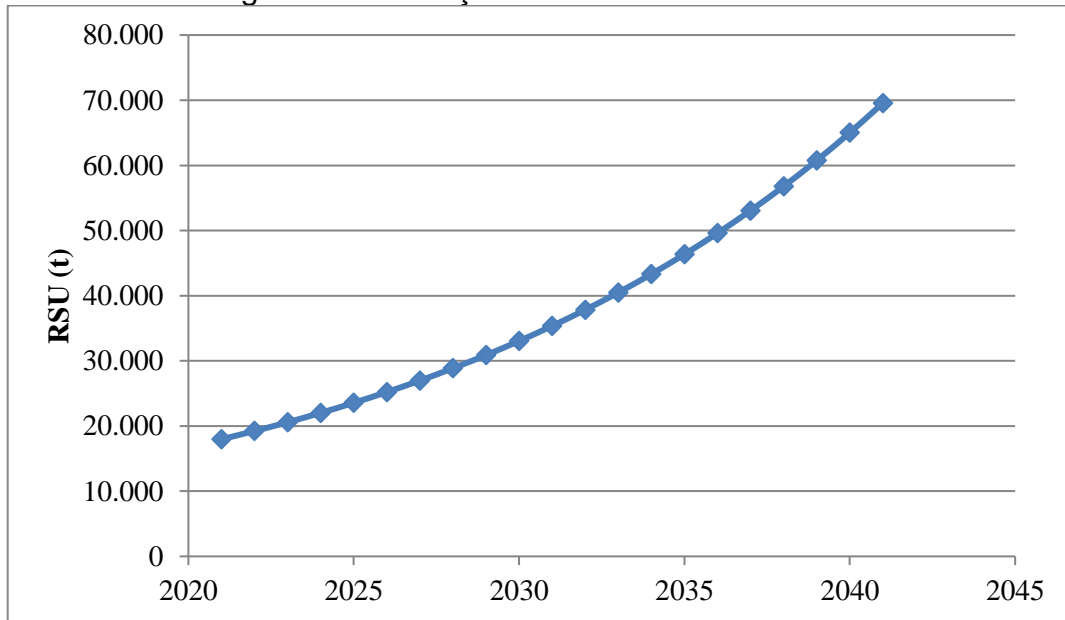
Tabela 5 - RSU dispostos no aterro da CIRSURES no período de operação da célula.

| Período (anos) | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | Total de RSU (t) |
|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------------|
| 2021 | 1.413,88 | 1.306,06 | 1.397,36 | 1.356,79 | 1.315,51 | 1.409,33 | 1.452,76 | 1.383,85 | 1.466,68 | 1.465,31 | 1.442,44 | 1.686,41 | 17.977,78 |
| 2022 | 1.505,07 | 1.390,30 | 1.487,49 | 1.444,30 | 1.400,36 | 1.500,24 | 1.546,46 | 1.473,11 | 1.561,28 | 1.559,82 | 1.535,48 | 1.795,19 | 19.236,23 |
| 2023 | 1.602,15 | 1.479,97 | 1.583,43 | 1.537,45 | 1.490,68 | 1.597,00 | 1.646,20 | 1.568,12 | 1.661,98 | 1.660,43 | 1.634,52 | 1.910,98 | 20.582,76 |
| 2024 | 1.705,49 | 1.575,43 | 1.685,56 | 1.636,62 | 1.586,83 | 1.700,01 | 1.752,38 | 1.669,27 | 1.769,18 | 1.767,52 | 1.739,94 | 2.034,23 | 22.023,56 |
| 2025 | 1.815,50 | 1.677,04 | 1.794,28 | 1.742,18 | 1.689,18 | 1.809,66 | 1.865,41 | 1.776,94 | 1.883,29 | 1.881,53 | 1.852,17 | 2.165,44 | 23.565,21 |
| 2026 | 1.932,59 | 1.785,21 | 1.910,01 | 1.854,55 | 1.798,13 | 1.926,38 | 1.985,73 | 1.891,55 | 2.004,76 | 2.002,89 | 1.971,63 | 2.305,11 | 25.214,77 |
| 2027 | 2.057,25 | 1.900,36 | 2.033,21 | 1.974,17 | 1.914,11 | 2.050,63 | 2.113,81 | 2.013,55 | 2.134,07 | 2.132,07 | 2.098,80 | 2.453,79 | 26.979,80 |
| 2028 | 2.189,94 | 2.022,93 | 2.164,35 | 2.101,51 | 2.037,57 | 2.182,90 | 2.250,15 | 2.143,43 | 2.271,72 | 2.269,59 | 2.234,18 | 2.612,06 | 28.868,39 |
| 2029 | 2.331,19 | 2.153,41 | 2.303,95 | 2.237,05 | 2.169,00 | 2.323,70 | 2.395,29 | 2.281,68 | 2.418,25 | 2.415,98 | 2.378,28 | 2.780,54 | 30.889,18 |
| 2030 | 2.481,55 | 2.292,31 | 2.452,56 | 2.381,34 | 2.308,90 | 2.473,57 | 2.549,78 | 2.428,85 | 2.574,22 | 2.571,81 | 2.531,68 | 2.959,89 | 33.051,42 |
| 2031 | 2.641,61 | 2.440,16 | 2.610,75 | 2.534,94 | 2.457,82 | 2.633,12 | 2.714,25 | 2.585,51 | 2.740,26 | 2.737,69 | 2.694,97 | 3.150,80 | 35.365,02 |
| 2032 | 2.812,00 | 2.597,55 | 2.779,14 | 2.698,44 | 2.616,35 | 2.802,96 | 2.889,31 | 2.752,27 | 2.917,01 | 2.914,27 | 2.868,80 | 3.354,02 | 37.840,57 |
| 2033 | 2.993,37 | 2.765,09 | 2.958,39 | 2.872,49 | 2.785,11 | 2.983,75 | 3.075,67 | 2.929,79 | 3.105,15 | 3.102,25 | 3.053,84 | 3.570,36 | 40.489,41 |
| 2034 | 3.186,44 | 2.943,44 | 3.149,21 | 3.057,77 | 2.964,75 | 3.176,20 | 3.274,06 | 3.118,77 | 3.305,44 | 3.302,34 | 3.250,81 | 3.800,65 | 43.323,67 |
| 2035 | 3.391,97 | 3.133,29 | 3.352,33 | 3.255,00 | 3.155,97 | 3.381,06 | 3.485,23 | 3.319,93 | 3.518,64 | 3.515,34 | 3.460,49 | 4.045,79 | 46.356,33 |
| 2036 | 3.610,75 | 3.335,39 | 3.568,56 | 3.464,94 | 3.359,53 | 3.599,14 | 3.710,03 | 3.534,06 | 3.745,59 | 3.742,08 | 3.683,69 | 4.306,74 | 49.601,27 |
| 2037 | 3.843,64 | 3.550,52 | 3.798,73 | 3.688,43 | 3.576,22 | 3.831,29 | 3.949,33 | 3.762,01 | 3.987,18 | 3.983,45 | 3.921,29 | 4.584,53 | 53.073,36 |
| 2038 | 4.091,56 | 3.779,53 | 4.043,75 | 3.926,34 | 3.806,89 | 4.078,40 | 4.204,06 | 4.004,66 | 4.244,35 | 4.240,38 | 4.174,21 | 4.880,23 | 56.788,49 |
| 2039 | 4.355,46 | 4.023,31 | 4.304,57 | 4.179,58 | 4.052,43 | 4.341,46 | 4.475,22 | 4.262,96 | 4.518,11 | 4.513,88 | 4.443,44 | 5.195,00 | 60.763,69 |
| 2040 | 4.636,39 | 4.282,82 | 4.582,22 | 4.449,17 | 4.313,81 | 4.621,49 | 4.763,87 | 4.537,92 | 4.809,53 | 4.805,03 | 4.730,05 | 5.530,08 | 65.017,15 |
| 2041 | 4.935,44 | 4.559,06 | 4.877,77 | 4.736,14 | 4.592,06 | 4.919,57 | 5.071,14 | 4.830,61 | 5.119,74 | 5.114,95 | 5.035,13 | 5.886,77 | 69.568,35 |

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A Figura 14 ilustra os números apresentados na Tabela 5, demonstrando o crescimento da deposição de RSU (toneladas) nos 20 anos de operação da célula.

Figura 14 – Geração de RSU de 2021 a 2041.



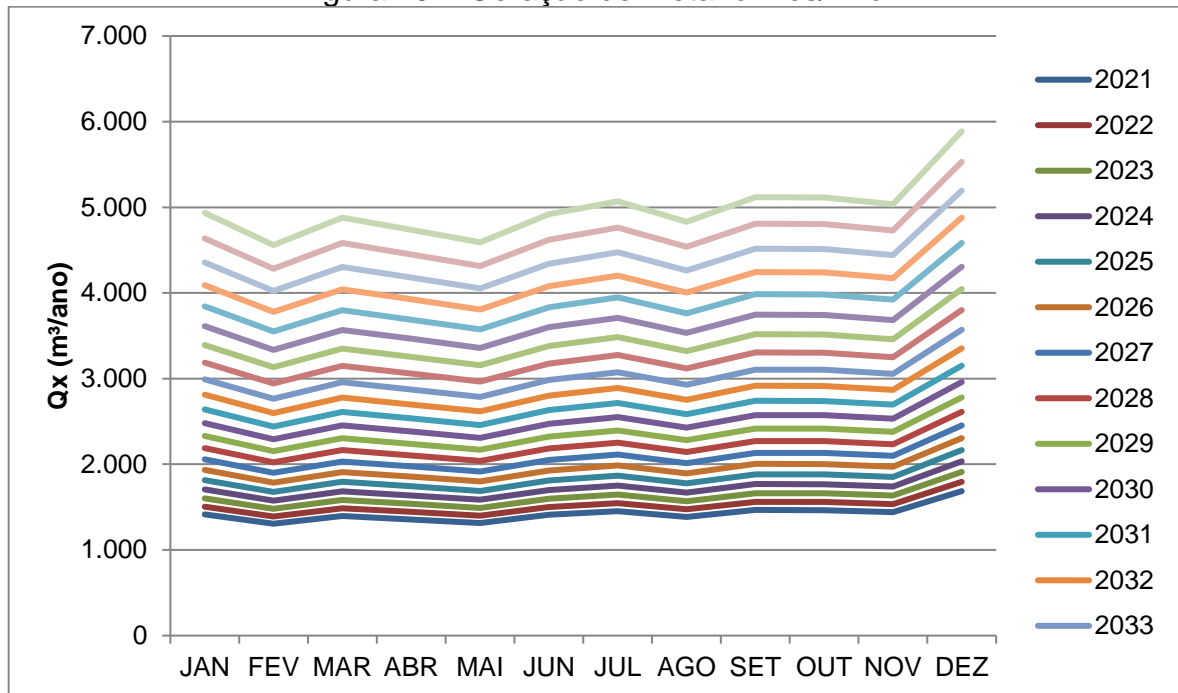
Fonte: Elaborada pela autora, 2021.

Esses dados de RSU dispostos no período de atividade da célula foram os dados de entrada no software Biogás e no Excel para as modelagens de produção de metano e sua conversão em energia, e as modelagens de emissões evitadas de dióxido de carbono equivalentes, os quais serão descritos na Seção que se segue.

5.2 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO

A produção de metano pela decomposição dos resíduos foi calculada mês a mês de 2021 a 2061. Esse cálculo mensal foi feito a fim de observar possíveis sazonalidades populacionais durante o ano e, conseqüentemente, se há uma mudança significativa na geração de RSU. Entretanto, conforme observado na Figura 15, a disposição de resíduos se mantém, relativamente, constante ao longo dos meses do ano.

Figura 15 – Geração de Metano Mês/Ano.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Com os valores das constantes definidos na metodologia, com o fluxo de resíduos conhecido, pode-se calcular a vazão de metano produzida no aterro, usando da Equação 2. Os cálculos foram efetuados no software Biogás e no Excel para minimizar possíveis erros e aumentar a confiabilidade dos resultados.

A Tabela 6 apresenta a vazão de metano, mês a mês, nos 40 anos de geração de metano pelo aterro.

Tabela 6 - Geração de metano de 2021 a 2061.

(continua)

| Período (anos) | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | $\sum Q_x$ (m ³ /ano) |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------------------------------|
| 2021 | 49.768,56 | 45.973,18 | 49.187,02 | 47.758,84 | 46.305,92 | 49.608,56 | 51.136,98 | 48.711,52 | 51.627,09 | 51.578,76 | 50.773,89 | 59.361,73 | 601.792,05 |
| 2022 | 92.918,84 | 85.832,80 | 91.833,09 | 89.166,64 | 86.454,02 | 92.620,12 | 95.473,70 | 90.945,32 | 96.388,75 | 96.298,51 | 94.795,81 | 110.829,47 | 1.123.557,07 |
| 2023 | 130.964,87 | 120.977,42 | 129.434,56 | 125.676,32 | 121.853,01 | 130.543,83 | 134.565,83 | 128.183,29 | 135.855,55 | 135.728,36 | 133.610,37 | 156.209,09 | 1.583.602,49 |
| 2024 | 165.135,05 | 152.541,76 | 163.205,46 | 158.466,66 | 153.645,80 | 164.604,16 | 169.675,54 | 161.627,73 | 171.301,77 | 171.141,38 | 168.470,80 | 196.965,76 | 1.996.781,88 |
| 2025 | 196.429,41 | 181.449,60 | 194.134,15 | 188.497,31 | 182.762,86 | 195.797,91 | 201.830,36 | 192.257,42 | 203.764,77 | 203.573,99 | 200.397,30 | 234.292,29 | 2.375.187,37 |
| 2026 | 225.665,62 | 208.456,24 | 223.028,74 | 216.552,92 | 209.964,97 | 224.940,14 | 231.870,44 | 220.872,68 | 234.092,76 | 233.873,59 | 230.224,09 | 269.163,94 | 2.728.706,12 |
| 2027 | 253.515,99 | 234.182,73 | 250.553,68 | 243.278,66 | 235.877,65 | 252.700,97 | 260.486,58 | 248.131,54 | 262.983,16 | 262.736,94 | 258.637,04 | 302.382,63 | 3.065.467,57 |
| 2028 | 280.537,21 | 259.143,29 | 277.259,16 | 269.208,72 | 261.018,88 | 279.635,32 | 288.250,76 | 274.578,85 | 291.013,45 | 290.740,98 | 286.204,09 | 334.612,35 | 3.392.203,07 |
| 2029 | 307.194,28 | 283.767,49 | 303.604,75 | 294.789,34 | 285.821,29 | 306.206,70 | 315.640,79 | 300.669,75 | 318.665,99 | 318.367,64 | 313.399,65 | 366.407,72 | 3.714.535,40 |
| 2030 | 333.879,82 | 308.417,97 | 329.978,47 | 320.397,28 | 310.650,19 | 332.806,45 | 343.060,07 | 326.788,51 | 346.348,06 | 346.023,79 | 340.624,24 | 398.237,05 | 4.037.211,90 |
| 2031 | 360.929,59 | 333.404,90 | 356.712,16 | 346.354,74 | 335.817,97 | 359.769,25 | 370.853,58 | 353.263,76 | 374.407,96 | 374.057,41 | 368.220,41 | 430.500,81 | 4.364.292,52 |
| 2032 | 388.635,04 | 358.997,53 | 384.093,88 | 372.941,41 | 361.595,82 | 387.385,64 | 399.320,82 | 380.380,78 | 403.148,03 | 402.770,58 | 396.485,52 | 463.546,65 | 4.699.301,71 |
| 2033 | 417.253,55 | 385.433,58 | 412.377,99 | 400.404,26 | 388.223,20 | 415.912,14 | 428.726,21 | 408.391,46 | 432.835,26 | 432.430,01 | 425.682,12 | 497.681,54 | 5.045.351,32 |
| 2034 | 447.016,59 | 412.926,87 | 441.793,25 | 428.965,43 | 415.915,48 | 445.579,50 | 459.307,60 | 437.522,36 | 463.709,75 | 463.275,59 | 456.046,38 | 533.181,57 | 5.405.240,36 |
| 2035 | 478.136,49 | 441.673,54 | 472.549,51 | 458.828,66 | 444.870,22 | 476.599,35 | 491.283,16 | 467.981,29 | 495.991,77 | 495.527,39 | 487.794,90 | 570.300,00 | 5.781.536,28 |
| 2036 | 510.811,91 | 471.857,12 | 504.843,13 | 490.184,60 | 475.272,25 | 509.169,73 | 524.857,02 | 499.962,72 | 529.887,41 | 529.391,30 | 521.130,37 | 609.273,80 | 6.176.641,37 |
| 2037 | 545.232,40 | 503.652,69 | 538.861,42 | 523.215,15 | 507.297,94 | 543.479,56 | 560.223,92 | 533.652,15 | 565.593,28 | 565.063,74 | 556.246,16 | 650.329,04 | 6.592.847,44 |
| 2038 | 581.582,10 | 537.230,34 | 574.786,37 | 558.096,99 | 541.118,62 | 579.712,40 | 597.573,08 | 569.229,81 | 603.300,41 | 602.735,55 | 593.330,13 | 693.685,34 | 7.032.381,13 |
| 2039 | 620.042,89 | 572.758,09 | 612.797,75 | 595.004,68 | 576.903,50 | 618.049,54 | 637.091,37 | 606.873,73 | 643.197,46 | 642.595,25 | 632.567,83 | 739.559,67 | 7.497.441,75 |
| 2040 | 660.797,04 | 610.404,31 | 653.075,69 | 634.113,12 | 614.822,19 | 658.672,67 | 678.966,08 | 646.762,30 | 685.473,51 | 684.831,72 | 674.145,22 | 788.169,41 | 7.990.233,26 |

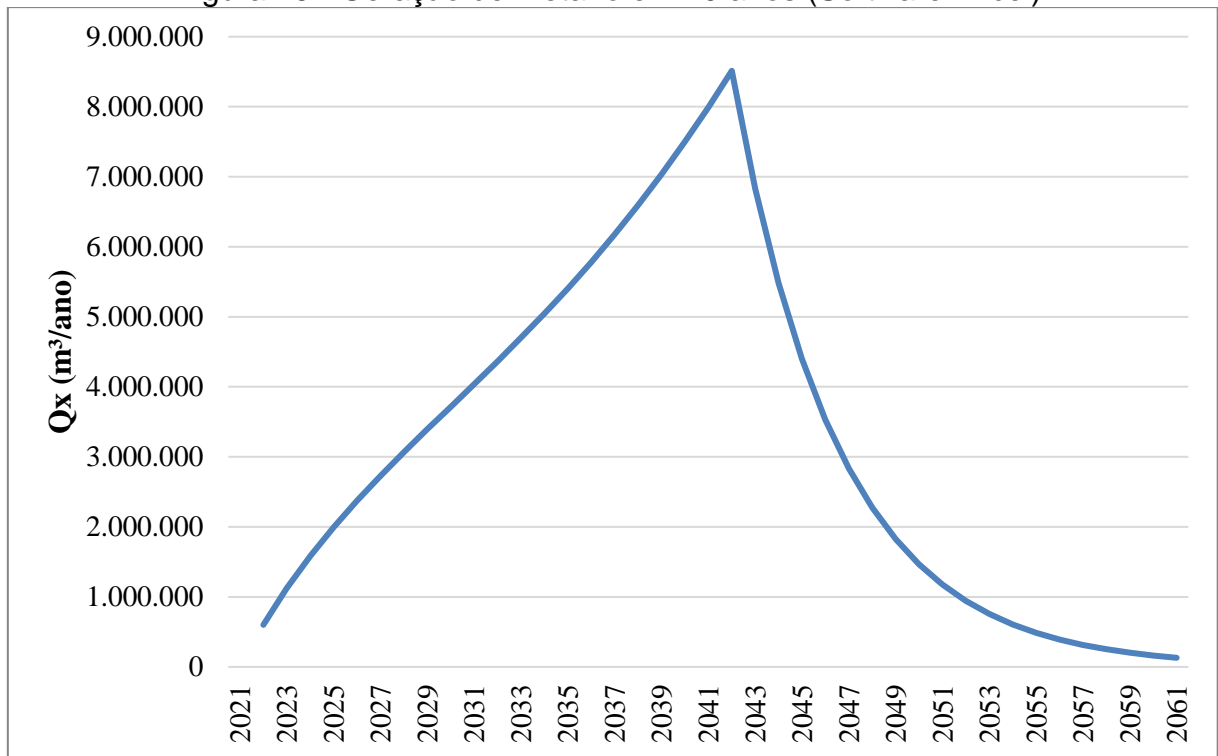
| Período (anos) | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | ΣQ_x (m ³ /ano) |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------------------------------|
| 2041 | 704.029,47 | 650.339,81 | 695.802,96 | 675.599,77 | 655.046,73 | 701.766,12 | 723.387,22 | 689.076,51 | 730.320,39 | 729.636,62 | 718.250,95 | 839.735,14 | 8.512.991,71 |
| 2042 | 564.996,89 | 521.909,92 | 558.394,96 | 542.181,51 | 525.687,32 | 563.180,50 | 580.531,84 | 552.996,86 | 586.095,84 | 585.547,10 | 576.409,89 | 673.903,24 | 6.831.835,88 |
| 2043 | 453.420,62 | 418.842,53 | 448.122,45 | 435.110,86 | 421.873,95 | 451.962,94 | 465.887,72 | 443.790,37 | 470.352,93 | 469.912,56 | 462.579,77 | 540.820,02 | 5.482.676,71 |
| 2044 | 363.878,57 | 336.129,00 | 359.626,69 | 349.184,64 | 338.561,78 | 362.708,76 | 373.883,65 | 356.150,12 | 377.467,07 | 377.113,66 | 371.228,96 | 434.018,23 | 4.399.951,13 |
| 2045 | 292.019,40 | 269.749,84 | 288.607,18 | 280.227,24 | 271.702,19 | 291.080,60 | 300.048,66 | 285.817,16 | 302.924,42 | 302.640,80 | 297.918,22 | 348.307,79 | 3.531.043,49 |
| 2046 | 234.351,05 | 216.479,32 | 231.612,69 | 224.887,63 | 218.046,12 | 233.597,65 | 240.794,69 | 229.373,65 | 243.102,54 | 242.874,93 | 239.084,97 | 279.523,55 | 2.833.728,78 |
| 2047 | 188.071,13 | 173.728,72 | 185.873,53 | 180.476,55 | 174.986,11 | 187.466,51 | 193.242,26 | 184.076,66 | 195.094,36 | 194.911,70 | 191.870,19 | 224.322,90 | 2.274.120,61 |
| 2048 | 150.930,61 | 139.420,57 | 149.167,00 | 144.835,82 | 140.429,64 | 150.445,39 | 155.080,55 | 147.724,98 | 156.566,89 | 156.420,30 | 153.979,43 | 180.023,34 | 1.825.024,54 |
| 2049 | 121.124,65 | 111.887,62 | 119.709,33 | 116.233,47 | 112.697,43 | 120.735,26 | 124.455,06 | 118.552,07 | 125.647,87 | 125.530,23 | 123.571,39 | 144.472,12 | 1.464.616,50 |
| 2050 | 97.204,81 | 89.791,92 | 96.068,98 | 93.279,54 | 90.441,80 | 96.892,31 | 99.877,52 | 95.140,27 | 100.834,78 | 100.740,37 | 99.168,36 | 115.941,59 | 1.175.382,27 |
| 2051 | 78.008,69 | 72.059,71 | 77.097,17 | 74.858,59 | 72.581,25 | 77.757,90 | 80.153,59 | 76.351,85 | 80.921,81 | 80.846,04 | 79.584,47 | 93.045,31 | 943.266,37 |
| 2052 | 62.603,44 | 57.829,27 | 61.871,92 | 60.075,42 | 58.247,82 | 62.402,18 | 64.324,76 | 61.273,80 | 64.941,27 | 64.880,47 | 63.868,04 | 74.670,61 | 756.988,99 |
| 2053 | 50.240,44 | 46.409,07 | 49.653,38 | 48.211,66 | 46.744,97 | 50.078,92 | 51.621,83 | 49.173,37 | 52.116,59 | 52.067,80 | 51.255,30 | 59.924,57 | 607.497,90 |
| 2054 | 40.318,90 | 37.244,15 | 39.847,77 | 38.690,76 | 37.513,71 | 40.189,28 | 41.427,49 | 39.462,56 | 41.824,54 | 41.785,38 | 41.133,34 | 48.090,59 | 487.528,48 |
| 2055 | 32.356,67 | 29.889,13 | 31.978,59 | 31.050,06 | 30.105,46 | 32.252,65 | 33.246,34 | 31.669,44 | 33.564,98 | 33.533,56 | 33.010,28 | 38.593,60 | 391.250,77 |
| 2056 | 25.966,84 | 23.986,59 | 25.663,42 | 24.918,26 | 24.160,20 | 25.883,36 | 26.680,81 | 25.415,32 | 26.936,53 | 26.911,31 | 26.491,37 | 30.972,09 | 313.986,10 |
| 2057 | 20.838,87 | 19.249,69 | 20.595,37 | 19.997,37 | 19.389,01 | 20.771,88 | 21.411,85 | 20.396,28 | 21.617,07 | 21.596,83 | 21.259,82 | 24.855,69 | 251.979,75 |
| 2058 | 16.723,59 | 15.448,24 | 16.528,18 | 16.048,27 | 15.560,05 | 16.669,82 | 17.183,41 | 16.368,39 | 17.348,11 | 17.331,86 | 17.061,41 | 19.947,16 | 202.218,48 |
| 2059 | 13.420,99 | 12.397,50 | 13.264,17 | 12.879,04 | 12.487,23 | 13.377,85 | 13.790,01 | 13.135,94 | 13.922,18 | 13.909,15 | 13.692,10 | 16.007,97 | 162.284,13 |
| 2060 | 10.770,60 | 9.949,23 | 10.644,75 | 10.335,67 | 10.021,24 | 10.735,97 | 11.066,74 | 10.541,84 | 11.172,81 | 11.162,35 | 10.988,17 | 12.846,69 | 130.236,07 |
| 2061 | 8.643,61 | 7.984,44 | 8.542,61 | 8.294,57 | 8.042,23 | 8.615,82 | 8.881,27 | 8.460,03 | 8.966,39 | 8.958,00 | 8.818,21 | 10.309,71 | 104.516,89 |

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

(conclusão)

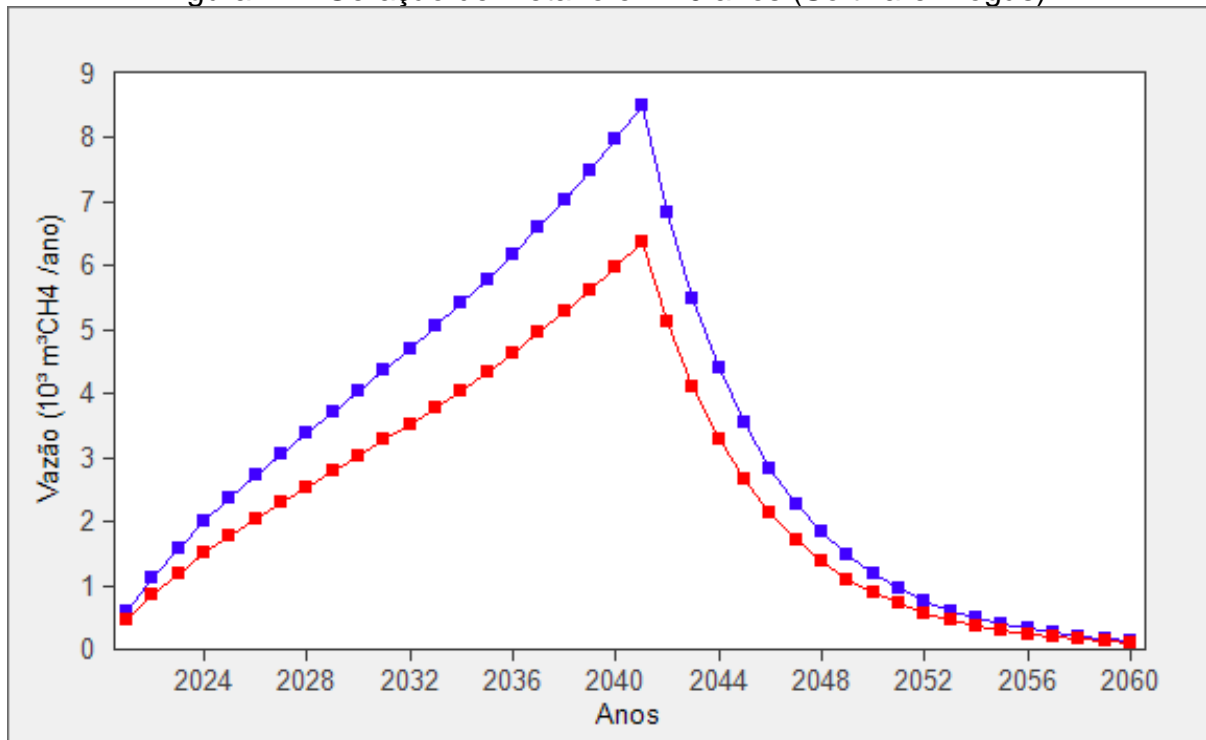
A partir dos dados da vazão de metano apresentados na Tabela 6, foram plotados gráficos nos dois softwares para melhor representação dos resultados obtidos. As Figuras 16 e 17 apresentam a vazão de metano gerada no aterro da CIRSURES nos 40 anos projetados. O gráfico representado pela Figura 16 foi plotado no software Excel utilizando os mesmos dados de entrada que os usados no software Biogás, o qual gerou o gráfico representado pela Figura 17.

Figura 16 - Geração de metano em 40 anos (Software Excel).



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 17 - Geração de metano em 40 anos (Software Biogás).



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Nas Figuras 16 e 17, a curva de vazão do metano começa, gradativamente, com a abertura da célula em 2021, e cresce com o passar dos anos, tendo seu pico em 2041 com uma vazão de 8.512.991,71 m³, no ano de encerramento da célula. A quantidade total estimada de metano gerado nos 20 anos de operação foi de 93.717.303,78 m³.

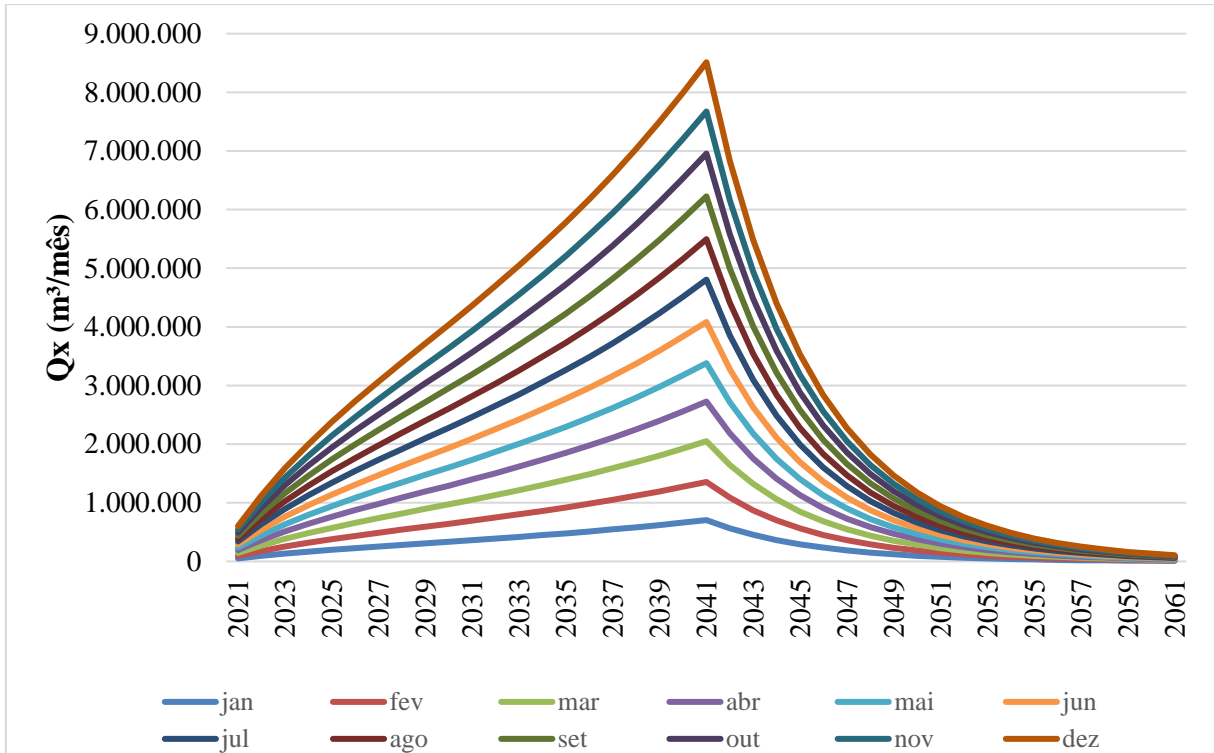
A célula do aterro em estudo deixa de receber resíduos após seu encerramento, porém, os resíduos que já existiam no local continuam se degradando e gerando gases. Para o ano seguinte ao seu fechamento em 2042 até 2061, quando a produção de metano chegar próximo a zero, estimou-se que o aterro produziria nesse período 34.170.133,84 m³ de metano.

O total da vazão de metano gerado em todo o período estudado de 40 anos foi de 127.887.437,61 m³.

A curva em vermelho representada na Figura 17 significa a taxa de 75% de coleta do metano total gerado. O software Biogás sugere se considerar 25% de perdas nos equipamentos de coleta, emissões fugitivas na superfície do aterro e porções oxidadas nas camadas de cobertura da célula do aterro.

Igualmente, foi gerado também o gráfico representado pela Figura 18, que demonstra a relação de geração de metano com os meses do ano.

Figura 18 - Geração de metano estimada para o período de 2021 a 2061 conforme os meses do ano.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Percebeu-se, com os dados obtidos, que os meses do final de ano são quando ocorre um maior pico de produção de RSU por parte da população, seguindo um padrão de consumo dos brasileiros. Possivelmente, esse aumento se dá em decorrência das festas de final de ano e, conseqüentemente, maior geração de biodegradáveis com potencial para produção de metano

5.3 POTÊNCIA E GERAÇÃO DE ENERGIA

O software Biogás apresenta a Equação 3 para os cálculos de potência, a qual considera uma eficiência de coleta dos gases de 75% e sugere valores para outras possíveis aplicações com os gases, tais como, a queima do biogás em *flares* (queimadores) e a geração de energia elétrica, a partir de motores ou turbinas.

Para ambas as aplicações, utilizou-se a mesma (Equação 3), mas com o valor de eficiência como sendo 95% para a queima e 33% para a conversão em energia elétrica.

Foi feita a estimativa de potência e energia nas 3 condições de aplicabilidade, e apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Geração de potência e energia de 2021 a 2061.

| | Potência Disponível Ef. 75% [kW] | Energia Disponível [kWh] | Potência Ef. 95% [kW] | Energia Queima [kWh] | Potência Ef. 33% [kW] | Energia Elétrica [kWh] |
|-------------|---|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 2021 | 508,51 | 4.454.514,89 | 483,08 | 4.231.789,14 | 167,81 | 1.469.989,91 |
| 2022 | 949,39 | 8.316.663,03 | 901,92 | 7.900.829,88 | 313,30 | 2.744.498,80 |
| 2023 | 1.338,12 | 11.721.957,62 | 1.271,22 | 11.135.859,74 | 441,58 | 3.868.246,01 |
| 2024 | 1.687,25 | 14.780.345,85 | 1.602,89 | 14.041.328,56 | 556,79 | 4.877.514,13 |
| 2025 | 2.007,00 | 17.581.334,81 | 1.906,65 | 16.702.268,07 | 662,31 | 5.801.840,49 |
| 2026 | 2.305,72 | 20.198.110,11 | 2.190,43 | 19.188.204,60 | 760,89 | 6.665.376,33 |
| 2027 | 2.590,28 | 22.690.846,39 | 2.460,77 | 21.556.304,07 | 854,79 | 7.487.979,31 |
| 2028 | 2.866,37 | 25.109.369,79 | 2.723,05 | 23.853.901,30 | 945,90 | 8.286.092,03 |
| 2029 | 3.138,73 | 27.495.300,54 | 2.981,80 | 26.120.535,52 | 1.035,78 | 9.073.449,18 |
| 2030 | 3.411,39 | 29.883.778,90 | 3.240,82 | 28.389.589,96 | 1.125,76 | 9.861.647,04 |
| 2031 | 3.687,77 | 32.304.856,96 | 3.503,38 | 30.689.614,11 | 1.216,96 | 10.660.602,80 |
| 2032 | 3.970,85 | 34.784.622,90 | 3.772,30 | 33.045.391,76 | 1.310,38 | 11.478.925,56 |
| 2033 | 4.263,25 | 37.346.110,92 | 4.050,09 | 35.478.805,37 | 1.406,87 | 12.324.216,60 |
| 2034 | 4.567,36 | 40.010.039,62 | 4.338,99 | 38.009.537,64 | 1.507,23 | 13.203.313,07 |
| 2035 | 4.885,32 | 42.795.413,37 | 4.641,06 | 40.655.642,70 | 1.612,16 | 14.122.486,41 |
| 2036 | 5.219,18 | 45.720.014,15 | 4.958,22 | 43.434.013,44 | 1.722,33 | 15.087.604,67 |
| 2037 | 5.570,87 | 48.800.806,18 | 5.292,32 | 46.360.765,87 | 1.838,39 | 16.104.266,04 |
| 2038 | 5.942,27 | 52.054.271,19 | 5.645,15 | 49.451.557,63 | 1.960,95 | 17.177.909,49 |
| 2039 | 6.335,24 | 55.496.688,61 | 6.018,48 | 52.721.854,17 | 2.090,63 | 18.313.907,24 |
| 2040 | 6.751,64 | 59.144.372,45 | 6.414,06 | 56.187.153,83 | 2.228,04 | 19.517.642,91 |
| 2041 | 7.193,36 | 63.013.874,07 | 6.833,70 | 59.863.180,36 | 2.373,81 | 20.794.578,44 |
| 2042 | 5.772,81 | 50.569.818,47 | 5.484,17 | 48.041.327,55 | 1.905,03 | 16.688.040,10 |
| 2043 | 4.632,79 | 40.583.229,93 | 4.401,15 | 38.554.068,44 | 1.528,82 | 13.392.465,88 |
| 2044 | 3.717,90 | 32.568.804,90 | 3.532,01 | 30.940.364,66 | 1.226,91 | 10.747.705,62 |
| 2045 | 2.983,68 | 26.137.078,16 | 2.834,50 | 24.830.224,25 | 984,62 | 8.625.235,79 |
| 2046 | 2.394,46 | 20.975.496,55 | 2.274,74 | 19.926.721,72 | 790,17 | 6.921.913,86 |
| 2047 | 1.921,60 | 16.833.230,28 | 1.825,52 | 15.991.568,76 | 634,13 | 5.554.965,99 |
| 2048 | 1.542,12 | 13.508.983,73 | 1.465,02 | 12.833.534,54 | 508,90 | 4.457.964,63 |
| 2049 | 1.237,58 | 10.841.213,38 | 1.175,70 | 10.299.152,71 | 408,40 | 3.577.600,42 |
| 2050 | 993,18 | 8.700.277,53 | 943,52 | 8.265.263,66 | 327,75 | 2.871.091,59 |
| 2051 | 797,05 | 6.982.136,27 | 757,20 | 6.633.029,45 | 263,03 | 2.304.104,97 |
| 2052 | 639,65 | 5.603.295,60 | 607,66 | 5.323.130,82 | 211,08 | 1.849.087,55 |
| 2053 | 513,33 | 4.496.750,05 | 487,66 | 4.271.912,55 | 169,40 | 1.483.927,52 |
| 2054 | 411,96 | 3.608.726,45 | 391,36 | 3.428.290,12 | 135,95 | 1.190.879,73 |
| 2055 | 330,60 | 2.896.070,81 | 314,07 | 2.751.267,27 | 109,10 | 955.703,37 |
| 2056 | 265,31 | 2.324.151,27 | 252,05 | 2.207.943,70 | 87,55 | 766.969,92 |
| 2057 | 212,92 | 1.865.175,08 | 202,27 | 1.771.916,33 | 70,26 | 615.507,78 |
| 2058 | 170,87 | 1.496.838,06 | 162,33 | 1.421.996,16 | 56,39 | 493.956,56 |
| 2059 | 137,13 | 1.201.240,68 | 130,27 | 1.141.178,65 | 45,25 | 396.409,43 |
| 2060 | 110,05 | 964.018,23 | 104,55 | 915.817,32 | 36,32 | 318.126,02 |
| 2061 | 0,00 | 0,09 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 0,03 |

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A potência disponível é a quantidade de potência que o aterro gera, considerando apenas as perdas com a coleta dos gases. Assim, tanto a potência disponível, quanto a energia disponível, concentram os valores máximos de geração nessa planta.

O valor de potência e energia máxima disponível em todo o período estudado foi de 7193,36 kW, e 63,01 GWh, respectivamente, no ano de pico de geração de metano (em 2041).

Se fosse possível aproveitar todo o potencial do metano produzido ao longo dos 40 anos de operação da célula de aterro, o acúmulo da energia disponível seria de 945,86 GWh.

Quando utilizado o metano gerado para queima, a potência e a energia sofrem uma perda de 5% em relação à potência e energia disponível, tendo uma eficiência de 95%. Os valores máximos de potência e energia estimados para essa finalidade foram de 6833,70 kW e 59,86 GWh, respectivamente.

Para a produção de energia elétrica, a potência e a energia sofrem uma perda de 77% em relação aos valores disponíveis. Esse valor leva em consideração diversas perdas. Essas perdas podem ocorrer devido ao equipamento de conversão em energia elétrica, seja motores ou turbinas, a limpeza do gás, as condições dos RSU, entre outras, resultando em uma eficiência de aproximadamente 33%.

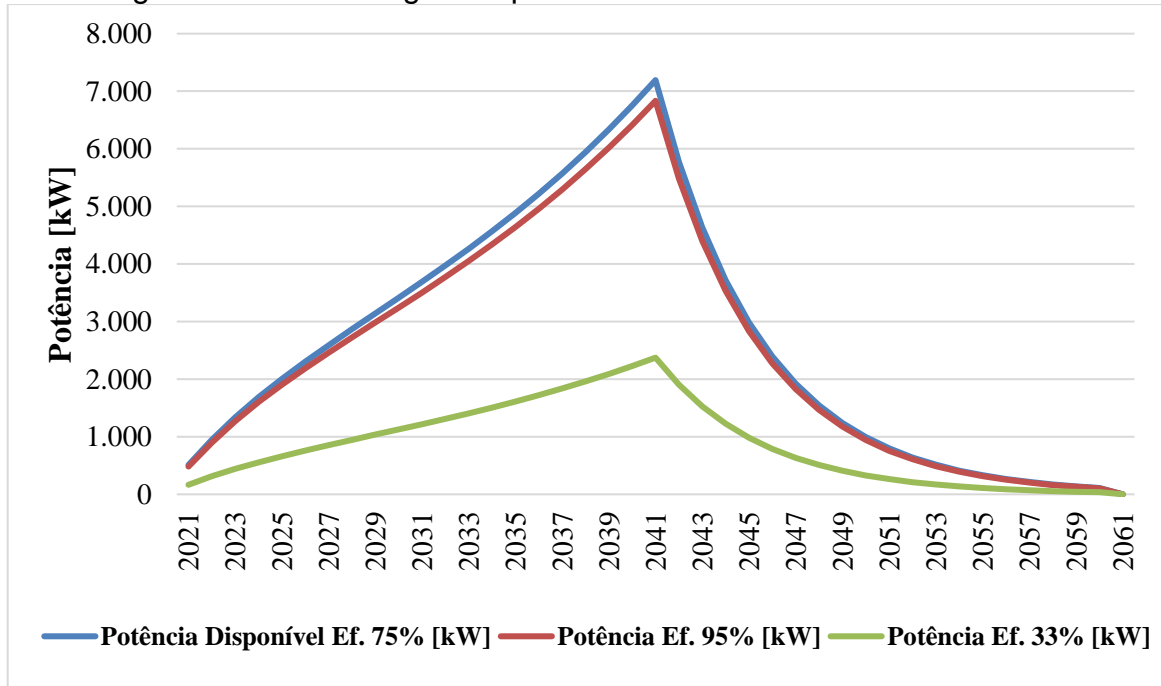
O máximo valor estimado de potência e energia elétrica foi no ano de 2041, com valores de 2373,81 kW e 20,79 GWh, respectivamente. A geração de energia elétrica nesses 40 anos foi de 312,13 GWh.

Segundo a EPE, em 2019, o consumo médio de energia elétrica nas residências brasileiras foi de 162 kWh/mês. Com a energia elétrica que o aterro geraria nos 40 anos estudados, seria possível abastecer, em média, 4 mil residências.

A potência elétrica média estimada para o aterro do CIRSURES foi de 869,07 Kw. Em trabalho descrito por Freire (2018), no qual também se tratava de um consórcio intermunicipal, com o aterro localizado em Brusque, foi apresentado uma potência média elétrica de 3,5 MW. A discrepância entre os resultados, se dá, primeiramente, pela quantidade de RSU dispostos nos aterros, sendo que o aterro do CIRSURE recebe, mensalmente, apenas 7%, do que o citado por Freire. Além disso, deve-se levar em consideração os parâmetros escolhidos por Freire, que foram de $k = 0,04$ e $L_0 = 0,10$ para as modelagens de geração de metano (FREIRE, 2018).

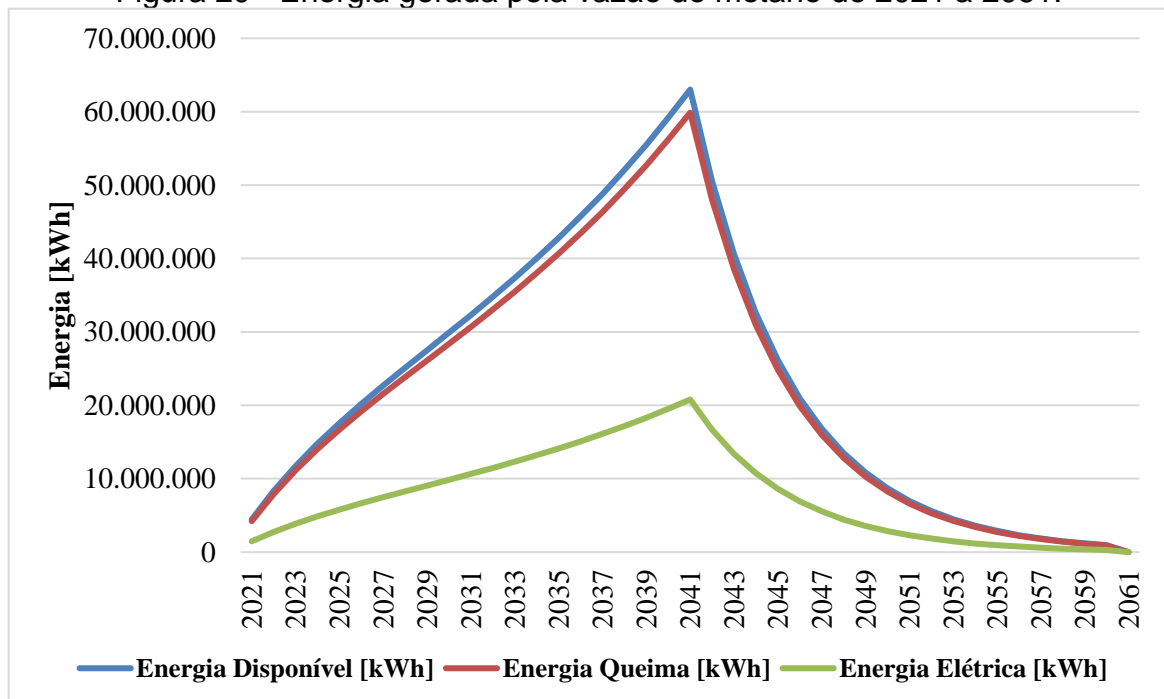
As Figuras 19 e 20 apresentam as 3 potências e energias simuladas, a fim de comparar as suas curvas e seus rendimentos. Os gráficos foram todos plotados no software Excel.

Figura 19 - Potência gerada pela vazão de metano de 2021 a 2061.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 20 - Energia gerada pela vazão de metano de 2021 a 2061.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

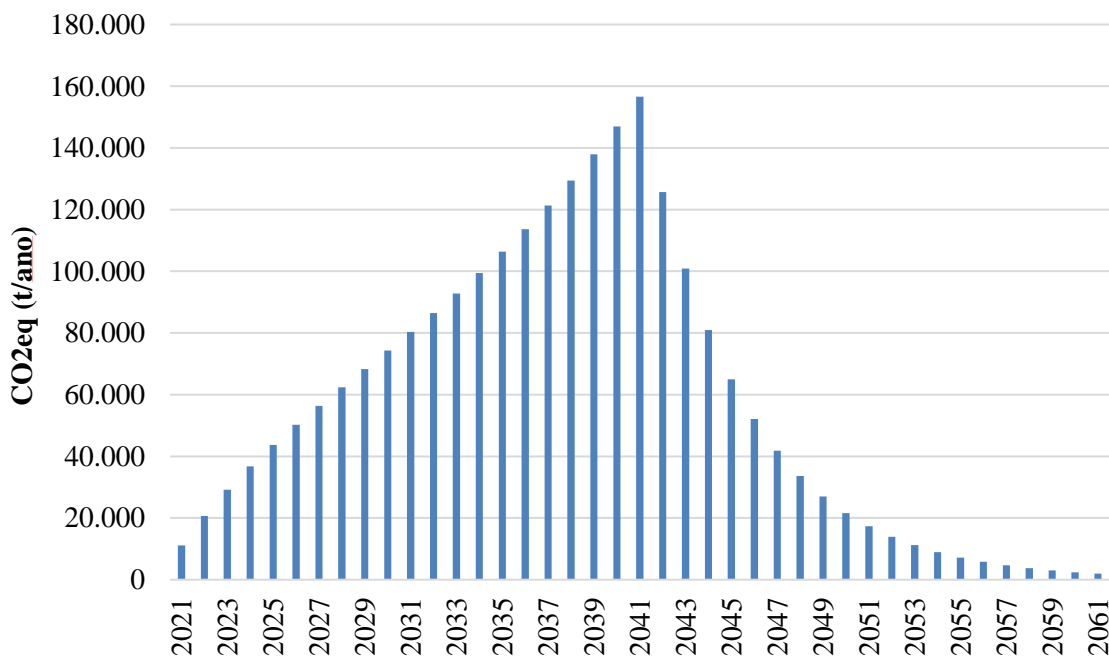
A Figura 19 e a Figura 20 apresentam gráficos que têm suas curvas semelhantes ao da geração de metano, visto que, quanto maior é a vazão de metano, maior é a potência e a energia obtidas. Com isso, seus picos de geração são no ano de 2041, que corresponde ao ano de fechamento da célula.

5.4 EMISSÕES EVITADAS DE CO_2eq

Para calcular as emissões evitadas de dióxido de carbono equivalentes com o aproveitamento do metano gerado, foi utilizada a Equação 5. Nos 40 anos de geração de metano, foi estimada emissões evitadas de 2.352.617,30 toneladas de CO_2eq .

A Figura 21 demonstra as emissões evitadas com seus respectivos anos.

Figura 21 - Emissões evitadas de CO_2eq com o aproveitamento do biogás de aterro.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

O biogás gerado nos aterros sanitários tem o metano como majoritário em sua composição. Esse gás é um dos maiores causadores do efeito estufa e, conseqüentemente, responsável pelas mudanças climáticas globais. O tratamento ou aproveitamento energético desse gás se faz essencial para preservação da qualidade do meio ambiente.

5.5. SUBSÍDIOS PARA OS GESTORES DO CONSÓRCIO

As políticas públicas, juntamente com ações do governo, norteiam a solução de problemas comuns à sociedade. Neste trabalho, foram elencadas duas políticas públicas relevantes no que tange ao aproveitamento energético dos RSU, nos âmbitos nacional e estadual: a Política Nacional de Resíduos Sólidos e a Política Estadual do Biogás de Santa Catarina.

Por meio da estimativa do potencial para geração de energia e das emissões evitadas a partir do aproveitamento do biogás, gerou-se subsídios importantes para a tomada de decisão dos gestores do consórcio intermunicipal de RSU com relação à investimentos em futuros projetos que possam integrar gerenciamento de resíduos, geração de energia e proteção climática. Os dados e análises podem apoiar a implementação das políticas públicas apresentadas neste estudo.

Tanto a Política Nacional de Resíduos Sólidos quanto a Política Estadual do Biogás esclarecem alguns pontos aos gestores públicos e empreendedores no setor de biogás gerados em aterros sanitários.

Nos objetivos das duas leis encontram-se pontos específicos para o setor, como o objetivo descrito no artigo 7º, inciso XIV da PNR:

“Incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético;”

E o objetivo descrito no artigo 4º, inciso V, da Política Estadual do Biogás:

“A articulação entre as diferentes esferas do Poder Público e destas com o setor empresarial, com vistas à cooperação técnica e financeira para empreendimentos de exploração, comercialização e transporte de biogás;”

Ainda nos objetivos, as duas leis incentivam a capacitação técnica e as pesquisas científicas no setor.

No capítulo III das duas políticas são apresentados os instrumentos, esses por sua vez têm a importância de estruturar o setor e delegar quais recursos e dados existem, os órgãos competentes e suas respectivas responsabilidades.

O Instrumento presente no inciso XI da PNRS cita o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR). O SINIR é uma ferramenta que disponibiliza, anualmente, informações sobre os RSU, permitindo o monitoramento dos avanços na gestão dos resíduos em diferentes recortes geográficos, desde o municipal ou conjunto de municípios, até o estadual e regional. (SINIR, 2018).

Os dados e as análises podem apoiar os gestores no que diz respeito ao dimensionamento de projetos para o aproveitamento energético, o que colabora para a implementação das referidas políticas públicas. Além disso, geram informações relevantes que reforçam a importância da construção de instrumentos econômicos (subsídios, incentivos) e de apoio (melhoria na capacitação e comunicação) que possam consolidar as políticas.

6 CONCLUSÕES

O aumento da geração de resíduos sólidos urbanos, com o passar dos anos, é uma problemática dos gestores e da sociedade em âmbito mundial. Considerando os limitados recursos e métodos de gestão e gerenciamento de RSU de forma ecologicamente correta, surgiu a alternativa de depositar os resíduos em aterros sanitários como uma medida mitigadora, mas que ainda está distante de ser a solução ideal para o problema.

O mesmo ocorre com relação à gestão de recursos energéticos, onde se buscam caminhos que reduzam a agressão ao meio ambiente, ou seja, o uso de fontes renováveis para suprir a crescente demanda por energia elétrica.

Assim, esta pesquisa teve como objetivo estimar o potencial energético dos RSU e as emissões evitadas de dióxido de carbono equivalentes, no aterro sanitário da CIRSURES, no município de Urussanga em Santa Catarina.

Através das modelagens realizadas nos softwares, foi atestado o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos dispostos no local de estudo. Foi estimado um volume de 127.887.437,61 m³ de metano gerados nos quarenta anos de operação da célula. Essa vazão de metano resultaria em uma potência disponível média de 2.635,69 kW e um total de 945,86 GWh de energia disponível.

Esse valor teórico de energia elétrica gerado no aterro do CIRSURES seria o suficiente para atender cerca de 4.000 residências, com um consumo mensal de energia elétrica em torno de 162 kWh. Se em cada residência tivesse uma composição familiar de 4 pessoas, 16 mil pessoas seriam atendidas. Esse valor é bem expressivo, visto que abrange a população inteira de um município participante do consórcio.

Os aterros sanitários são uma das principais fontes de emissão de gases de efeito estufa. Dessa maneira, a presente investigação também avaliou as emissões evitadas de dióxido de carbono equivalentes (CO₂eq) nos 40 anos estudados. O resultado foi de 2.352.617,30 toneladas CO₂eq evitadas de serem lançadas na atmosfera.

A importância do aproveitamento energético dos RSU se dá pela diversificação energética, provinda de fontes de energia renovável, pela mitigação de emissões de poluentes e os benefícios de uma população com responsabilidade por seus resíduos, caracterizando-se como uma solução de transformação socioambiental da realidade

de tratamento de resíduos no Brasil. Para tanto, são necessárias ações coordenadas entre as diversas esferas políticas (federal, estadual e municipal) e sociedade civil.

Desse modo, o presente trabalho buscou incentivar a implementação de projetos de recuperação energética de resíduos sólidos, bem como fomentar pesquisas sobre o tema na região, tanto para os gestores do consórcio de municípios, quanto para empresários. A pesquisa também apontou políticas públicas existentes no setor, que trazem propostas de solução em âmbito jurídico, institucional, ambiental, sociocultural e econômico. Quanto maior for a discussão por parte da população e gestores públicos e privados e a implementação de ações que reflitam às políticas públicas, maior será a contribuição para sua consolidação e para indicação de aprimoramentos.

Pesquisas complementares podem ser sugeridas para o aprimoramento do presente trabalho, as quais incluem o estudo da viabilidade econômica do aproveitamento energético dos RSU no aterro da CIRSURES e da viabilidade da venda de créditos de carbono a partir das emissões evitadas de (CO₂eq) com o aproveitamento dos resíduos. Igualmente, sugere-se um estudo preciso e representativo das constantes utilizadas nos cálculos de geração de metano. Com relação às políticas públicas, outra proposta de estudo poderia discutir as oportunidades para o desenvolvimento de projetos de biogás considerando, o marco legal do saneamento básico sancionado em julho de 2020, que abre possibilidades para aterros sanitários e estações de esgoto integrarem a gestão de resíduos à geração de energia.

A expectativa é de que a presente investigação contribua, de forma significativa, para o fomento ao uso de fontes renováveis de energia e consequente proteção do meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- ABNT **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro/RJ. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004.
- BRASIL. ABRELPE. . **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2019. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 24 ago. 2020.
- BRASIL. ONU BRASIL. . **A ONU e o Meio Ambiente**. 2020. Disponível em: <https://brasil.un.org/>. Acesso em: 24 ago. 2020.
- CARVALHO, Ruy de Quadros; TAVARES, André Neiva; SANTOS, Glicia Vieira dos. Oportunidades enterradas: : geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos. **EDUFES**. Vitória, p. 1-320. jun. 2019.
- CRITICAL ANALYSIS OF THE 10 YEARS OF CREATION AND IMPLEMENTATION OF THE NATIONAL SOLID WASTE POLICY (PNRS) IN BRAZIL**. São Paulo: Fundação Escola de Comércio - Fecap Álvares Penteado, 20 jan. 2021. Disponível em: https://liceu.emnuvens.com.br/LICEU_ON-LINE/article/view/1862. Acesso em: 06 abr. 2021.
- FREIRE, Vanderson Henrique Neves et al. **Estimativa do potencial de produção de biogás em um aterro sanitário para aproveitamento energético**. 2018.
- Fu, S., Angelidaki, I., & Zhang, Y. (2020). **In situ Biogas Upgrading by CO₂-to-CH₄ Bioconversion**. *Trends in Biotechnology*. doi:10.1016/j.tibtech.2020.08.006
- GONÇALVES, Guilherme et al. A TRANSIÇÃO DOS LIXÕES PARA ATERROS SANITÁRIOS E SEU POTENCIAL IMPACTO NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS. In: CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO DA ASSEMAE, 49., 2019, Cuiabá.
- Kapoor, R., Ghosh, P., Tyagi, B., Vijay, V. K., Vijay, V., Thakur, I. S., ... Kumar, A. (2020). **Advances in biogas valorization and utilization systems: A comprehensive review**. *Journal of Cleaner Production*, 123052. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123052
- KAPOOR, Rimika; GHOSH, Pooja; TYAGI, Bhawna; et al. **Advances in biogas valorization and utilization systems: A comprehensive review**. *Journal of Cleaner Production*, v. 273, p. 123052, 2020.
- LIMA, Rodolfo M.. Spatially distributed potential of landfill biogas production and electric power generation in Brazil. **Waste Management**. Minas Gerais, p. 323-334. abr. 2018.
- LOPES, Luciana. **GESTÃO E GERENCIAMENTO INTEGRADO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**: alternativa para pequenos municípios. 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- Majdinasab, A., Zhang, Z. & Yuan, Q. Modelling of landfill gas generation: a review. *Rev Environ Sci Biotechnol* 16, 361–380 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11157-017-9425-2>
- MARCO, Edenara de. **Estudo do Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos do Município de Cotiporã - RS**. 2014. 89 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.
- Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos / José Henrique Penido Monteiro ...[et al.]; coordenação técnica Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.
- MARQUES JUNIOR, Francisco Auriberto Ferreira. **CONDIÇÕES INTERVENIENTES NA GERAÇÃO DE BIOGÁS DE RESÍDUOS RECÉM DISPOSTOS EM ATERRO SANITÁRIO E COM UM ANO DE ATERRAMENTO**. 2020. 78 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e

Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

NIKKHAH, Amin *et al.* **Hybrid landfill gas emissions modeling and life cycle assessment for determining the appropriate period to install biogas system.** Cleaner Production. Iran, p. 772-780. mar. 2018.

OLIVEIRA, Allan Luís Augusto Redes de. **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA APLICADA NA GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ESTUDO DE CASO DO DISTRITO FEDERAL.** 2019. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Mecânicas, Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

PIÑAS, Jean Agustin Velásquez; VENTURINI, Osvaldo Jose; LORA, Electo Eduardo Silva; OLIVEIRA, Michele Aparecida de; ROALCABA, Orly Denisse Calle. Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos landgem (epa) e biogás (cetesb). **Revista Brasileira de Estudos de População**, [S.L.], v. 33, n. 1, p. 175-188, 10 maio 2016.

POLZER, Verônica Rosária. **Desafios e perspectivas rumo ao gerenciamento integrado de resíduos sólidos nas cidades brasileiras:** contribuições a partir de estudos de caso europeus. 2017. 249 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2017.

Purmessur, B., & Surroop, D. (2019). **Power generation using landfill gas generated from new cell at the existing landfill site.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 103060. doi:10.1016/j.jece.2019.103060

RAFIEE, Ahmad. Biogas as an energy vector. **Biomass And Bioenergy.** Australia, p. 105-135. jan. 2021.

RASAPOOR, M.; YOUNG, B.; BRAR, R.; *et al.* **Recognizing the challenges of anaerobic digestion: Critical steps toward improving biogas generation.** *Fuel*, v. 261, p. 116497, 2020.

ROSSI, Salete de. **DIAGNÓSTICO E PLANO DE MELHORIA DA GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS (CLASSE II) EM UMA UNIVERSIDADE FEDERAL.** 2017. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Gestão Pública, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

SANTOS, Genivaldo da Silva. **POTENCIAL USO DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DE EUTERPE OLERACEA PARA FINS ENERGÉTICOS NO MUNICÍPIO DE LARANJAL DO JARI/AP.** 2018. Curso de Tecnologia em Gestão Ambiental, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Amapá, Laranjal do Jari, 2018.

SANTOS, Rafaela Ediene dos. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal Of Environmental Management.** São Paulo, p. 198-206. fev. 2019.

SÃO PAULO. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **O MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO.** Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/guia_mdl_mct_2009.pdf. Acesso em: 28 jan. 2020.

SEMAN, S.Z.A.; IDRIS, I.; ABDULLAH, A.; *et al.* **Optimizing purity and recovery of biogas methane enrichment process in a closed landfill.** *Renewable Energy*, v. 131, p. 1117–1127, 2019.

SILVA, Nicole Fernandes da *et al.* First order models to estimate methane generation in landfill: A case study in south Brazil. **Journal Of Environmental Chemical Engineering.** Pelotas, p. 1-7. 18 maio 2020.

SIQUEIRA, Thais Menina Oliveira de. COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO ESTADO DE SÃO PAULO (BRASIL). *Ambiente & Sociedade*. São Paulo, p. 243-264. dez. 2015.

SOUSA, Edilmar Ribeiro. **ANÁLISE DA GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO MUNICÍPIO DE SALVADOR E OS DESAFIOS AO CUMPRIMENTO DA LEI FEDERAL Nº 12.305 / 2010**. 2018. 145 f. Tese (Doutorado) - Curso de Planejamento Territorial e Desenvolvimento Social, Universidade Católica do Salvador, Salvador, 2018.

Stolecka, K., & Rusin, A. (2021). *Potential hazards posed by biogas plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110225. doi:10.1016/j.rser.2020.110225

TIERNO, Ricardo. **Diagnóstico e Sistematização de Estratégias para a Gestão dos Resíduos Domiciliares Aplicáveis a Políticas de Planejamento Urbano**. 2017. 187 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

TOUZE-FOLTZ, Nathalie; XIE, Haijian; STOLTZ, Guillaume. Performance issues of barrier systems for landfills: A review. *Geotextiles And Geomembranes*. Eua, p. 221-418. set. 2020.

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. Handbook of Solid Waste Management. 2ª Ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC. **Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site**. Disponível em: https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-04-v4.pdf/history_view. Acesso em: 28 jan. 2021.

VIABILITY OF THE USE OF BIOGAS AS A RENEWABLE ENERGY SOURCE IN SANITARY LAND. São Paulo: Cidades Verdes, v. 5, n. 12, 2017.

VICTORINO, Alfiado. **POTENCIAL DA DIGESTÃO ANAERÓBIA NA GESTÃO DE RESÍDUOS E PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL: UM ESTUDO DE CASO**. 2017. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Desenvolvimento Sustentável, Centro de Desenvolvimento Sustentável (Cds), Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

WASAJJA, Henry; LINDEBOOM, Ralph E.F.; VAN LIER, Jules B.; *et al.* **Techno-economic review of biogas cleaning technologies for small scale off-grid solid oxide fuel cell applications**. Fuel Processing Technology, v. 197, p. 106215, 2020.