

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Marcos Vinícius da Silva Santos

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DE TECNOLOGIAS DE
RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA A PARTIR DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
DE MACEIÓ – AL**

Maceió

2022

Marcos Vinícius da Silva Santos

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DE TECNOLOGIAS DE
RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA A PARTIR DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
DE MACEIÓ – AL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Professora Dra. Karina Ribeiro Salomon.

Coorientador: Professor Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim

Maceió

2022

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

S237E Santos, Marcos Vinícius da Silva
Estudo da viabilidade técnico-econômica de tecnologias de recuperação energética a partir dos resíduos sólidos urbanos de Maceió - AL / Marcos Vinícius da Silva Santos. – Maceió, 2022.
86 f. : il. color.

Orientadora: Karina Ribeiro Salomon.
Coorientador: Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim.
Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 77-86.

1. Resíduos sólidos urbanos. 2. Recuperação energética. 3. Biogás. 4. Incineração. 5. Viabilidade econômica. I. Título.

CDU: 620.97

Folha de Aprovação

AUTOR: MARCOS VINÍCIUS DA SILVA SANTOS

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DE TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA A PARTIR DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE MACEIÓ – AL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Documento assinado digitalmente
 KARINA RIBEIRO SALOMON
Data: 20/12/2022 12:12:58-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Professora Dra. Karina Ribeiro Salomon - Universidade Federal de Alagoas
(Orientadora)

Professor Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim
(Coorientador)

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 IVETE VASCONCELOS LOPES FERREIRA
Data: 20/12/2022 16:00:17-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Professora Dra. Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira - Universidade Federal de Alagoas

Professor Dr. José Edmundo Accioly de Souza - Universidade Federal de Alagoas

AGRADECIMENTOS

Não gosto desse tipo de texto, porque odeio despedidas, mas aproveitarei o espaço para registrar meu apreço por aqueles que me ajudaram a concluir esta etapa da minha vida, e, certamente, estarão comigo nas próximas.

Aos meus pais, que me deram todo o apoio necessário para enfrentar esta jornada de cursar cinco anos (ou um pouco mais) de engenharia, em tempo integral, morando sozinho em outra cidade. Ao invés de me prender em uma gaiola, eles me deram asas para iniciar meu voo, aceitando minhas escolhas.

Às minhas irmãs, pelo apoio incondicional e confiança em minha capacidade, e aos demais familiares (ainda que não entendam o que faz um Engenheiro Ambiental e Sanitarista e vez ou outra me perguntem se engenheiro ambiental mexe com planta).

À professora Karina, minha orientadora, por ter visto o brilho nos meus olhos desde a disciplina de energia e meio ambiente, acreditado em minhas ideias e no meu potencial, e por ter me orientado com excelência mesmo em tempos turbulentos. Coincidência ou não, apelidei o trabalho final da disciplina de “TCC”, e não é que ele culminou nisto aqui?

Agradeço também ao professor Eduardo Lucena, meu coorientador, fonte de inspiração e exemplo de docente e pesquisador.

Às professoras Daniele (que sempre foi uma professora amiga, me oferecendo os melhores conselhos, ouvindo minhas amarguras e entendendo minhas pretensões ao longo do curso) e Ivete (que me acolheu desde o primeiro período, com o PROA, me incentivou a permanecer aqui e me instruiu com o seu profissionalismo exemplar).

Aos professores, pelos quais eu me orgulho em ter sido orientado por eles durante as iniciações científicas e monitorias, em especial Márcio Barboza e Nélia Callado (que me tutoraram pelo vasto mundo do saneamento), Rochana Campos (referência na geologia, na conservação costeira e no afeto) e Christiane Amorim (que me ofereceu a primeira chance de me aventurar pelo geoprocessamento). E aos demais membros do corpo docente, a quem agradeço na figura dos tutores do PET Ambiental, Marllus Gustavo e Christopher Freire, por quem tenho profunda consideração e gratidão pelos momentos de troca e ensinamentos.

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica, por me proporcionar uma bolsa de permanência que me possibilitou viver a graduação em

sua plenitude, além de me oferecer a oportunidade de dar meus primeiros passos no universo acadêmico.

Ao PET Engenharia Ambiental e ao Centro Acadêmico, pelo acolhimento desde o meu nivelamento e pela honra de me possibilitar participar posteriormente. Ambos os espaços me deram ampla oportunidade de crescimento pessoal e foram meu segundo lar em Maceió por todos esses anos.

As empresas Ipê Consultoria Ambiental e HIDROBR Soluções Integradas, por me oferecerem uma oportunidade de vivenciar o mundo profissional, na condição de estagiário.

Agradeço a todas as amigas que fiz ao longo da graduação, sejam as passageiras ou as perenes. Sem dúvidas, eu encheria páginas caso fosse falar da importância de cada uma na minha vida. Não as citarei para não correr o risco de esquecer alguém.

Ademais, agradeço aos amigos para além da Ufal, que mesmo não entendendo meus sumiços esporádicos, sempre se mantiveram comigo, torcendo pelas minhas conquistas.

Nesse sentido, estendo meus agradecimentos a todo o corpo discente de engenharia ambiental e sanitária, por ser minha família honorária. Quem viveu este curso sabe que ele não se faz sozinho, e eu não estaria aqui se não fosse pela contribuição dos que vieram antes e depois de mim e pelo apoio dos que vieram comigo.

À Universidade Federal de Alagoas, pela oportunidade de cursar uma graduação a nível de excelência de maneira gratuita. E, por fim, a todos aqueles que, mesmo indiretamente, colaboraram com a minha trajetória acadêmica.

RESUMO

A expansão urbana e as mudanças no padrão de consumo evidentes nas últimas décadas desencadeiam um constante aumento na produção de Resíduos Sólidos Urbanos, tornando a disposição final destes uma das maiores preocupações ambientais do país. No mercado, existem diferentes tecnologias para destinação final adequada desses resíduos, dentre as quais se destacam aquelas que permitem a recuperação energética dos materiais descartados pela população. Sendo assim, o presente trabalho objetivou estudar duas destas tecnologias possíveis de serem aplicadas ao município de Maceió - AL. Para tanto, após revisão de literatura e conhecimento do estado da arte por meio da bibliometria, estimou-se e analisou-se o potencial de recuperação energética do biogás gerado pela disposição dos resíduos em aterro sanitário e pela incineração destes, para os primeiros 20 anos de produção, seguida de uma avaliação técnico-econômica. Desse modo, o potencial energético resultante das tecnologias analisadas, mostrou-se suficiente para abastecer em média 15.279 habitantes anualmente, para o caso da incineração, e 14.665, para o aproveitamento do biogás. O estudo da viabilidade econômica indicou atratividade da recuperação energética apenas para o cenário do biogás, em que se obteve um Valor Presente Líquido em torno de 66 milhões de reais, Taxa Interna de Retorno de 23,4% e Tempo de Retorno do Capital Descontado menor que 8 anos. Assim, as vantagens do aproveitamento energético do biogás se sobressaem em relação à incineração; em todos os casos, todavia, antes que se aplique um projeto dessa natureza, deve-se avaliar profundamente os investimentos e receitas específicos de cada rota tecnológica, bem como os seus impactos ambientais.

Palavras-chave: Aterro sanitário; Avaliação econômica; Biogás; Incineração; Potencial energético.

ABSTRACT

Urban expansion and changes in consumption patterns evident in recent decades trigger a constant increase in the production of Urban Solid Waste, making their final disposal one of the biggest environmental concerns in the country. In the market, there are different technologies for the adequate final destination, among which those that allow the energy recovery of materials discarded by the population stand out. Therefore, the present work aimed to study two of these technologies that can be applied to the city of Maceio - AL. Therefore, after reviewing the literature, the potential for energy recovery of the biogas generated by the disposal of waste in a sanitary landfill and by their incineration was estimated and analyzed for the first 20 years of production, followed by a technical and economic evaluation. Thus, the energy potential resulting from the technologies analyzed proved to be sufficient to supply an average of 15,279 inhabitants annually, in the case of incineration, and 14,665, for the use of biogas. The economic feasibility study indicated the attractiveness of energy recovery only for the biogas scenario, in which a Net Present Value of around 66 million reais was obtained Internal Rate of Return of 23.4% and Payback Time for Discounted Capital less than 8 years. Thus, the advantages of the energy use of biogas stand out in relation to incineration; in all cases, however, before implementing a project of this nature, the specific investments and revenues of each technological route, as well as their environmental impacts, must be thoroughly evaluated.

Key-words: Sanitary landfill; Economic evaluation; Biogas; Incineration; Energy potential.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos de realização de leilões de energia	26
Figura 2 – Fluxograma geral da metodologia do estudo	28
Figura 3 – Localização de Maceió.....	29
Figura 4 – Localização do aterro sanitário de Maceió.....	30
Figura 5 – Representação das etapas a serem desenvolvidas.....	36
Figura 6 – Cenário mundial da linha de pesquisa	48
Figura 7 – Cenário nacional da linha de pesquisa.....	49
Figura 8 – Países com maior número de publicações na linha de pesquisa	49
Figura 9 – Gráfico de comparativo entre os métodos de projeção	52
Figura 10 – Histórico de números de habitantes (IBGE) e projeções populacionais.....	52
Figura 11 – Valores de emissão de gás metano	57
Figura 12 – Estimativa de habitantes a serem atendidos pela recuperação energética	61
Figura 13 – Fluxo de caixa descontado acumulado para o biogás.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo da composição e geração <i>per capita</i> dos RSU de Maceió.	18
Tabela 2 – Caracterização gravimétrica dos RSU em Maceió	19
Tabela 3 – Composição média do biogás proveniente de RSU	20
Tabela 4 – Fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário	21
Tabela 5 – Valores típicos de COD _i para os componentes do RSU.....	37
Tabela 6 – Poder calorífico de materiais encontrados nos RSU	40
Tabela 7 – Valores Capex para incineração.....	42
Tabela 8 – Valores Opex para incineração	43
Tabela 9 – População de Maceió nos últimos 3 Censos Demográficos do IBGE	50
Tabela 10 – Valores das constantes para a projeção populacional	50
Tabela 11 – Projeções populacionais (2010-2030)	51
Tabela 12 – Estimativa de produção de RSU em Maceió (2010-2030).....	53
Tabela 13 – Cálculo da Fração de carbono orgânico degradável no lixo	54
Tabela 14 – Estimativa da produção de gás metano (2010-2050).....	55
Tabela 15 – Estimativa do potencial energético para o aproveitamento do biogás...	57
Tabela 16 – Poder Calorífico Inferior do RSU de Maceió.....	59
Tabela 17 – Estimativa do Potencial energético da incineração	60
Tabela 18 – Poder Calorífico Inferior do RSU de Maceió.....	62
Tabela 19 – Valores Capex levantados.....	63
Tabela 20 – Taxas para cálculo do valor Opex	64
Tabela 21 – Valores Opex levantados para o aproveitamento do biogás	64
Tabela 22 – Valores Opex levantados para a incineração	65
Tabela 23 – Tarifas de comercialização de energia adotadas	66
Tabela 24 – Receitas anuais pela venda de energia.....	67
Tabela 25 – Parâmetros básicos usados no cálculo dos créditos de carbono	68
Tabela 26 – Créditos de carbono na recuperação energética do biogás	68
Tabela 27 – Fluxo de caixa do aproveitamento energético do Biogás	69
Tabela 28 – Fluxo de caixa do aproveitamento energético pela incineração	70
Tabela 29 – Resultados do VPL para os cenários avaliados	71
Tabela 30 – Potencial energético da incineração.....	72

LISTAS DE SIGLAS

BEM – Balanço Energético Nacional

Capex – *Capital Expenditure*

CBIO – Toneladas CO2 equivalente não emitidas

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

COD – Carbono Orgânico Degradável

EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

Opex – *Operational Expenditure*

PCI – Poder Calorífico Inferior

PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia

PNRS – Política Nacional dos Resíduos Sólidos

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SUDES – Superintendência de Desenvolvimento Sustentável

TIR – Taxa Interna de Retorno

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

TRC – Tempo de Retorno de Capital

VP – Valor Presente

VPL – Valor Presente Líquido

WTE – *Waste to Energy*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivo Geral	15
2.2. Objetivos Específicos	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1. Revisão de literatura e bibliometria	16
3.2. Caracterização dos Resíduos Sólidos de Maceió	16
3.3. Rotas Tecnológicas.....	19
3.3.1. Aproveitamento energético do biogás gerado.....	19
3.3.2. Aproveitamento energético pela incineração dos Resíduos.....	21
3.4. Avaliação técnico-econômica.....	23
3.4.1. Custos e despesas.....	24
3.4.1.1. Custos de investimento (Capex).....	24
3.4.1.2. Custos de operação e manutenção (Opex)	25
3.4.2. Receitas	25
3.4.2.1. Venda da energia	25
3.4.2.2. Créditos de carbono	26
4. MÉTODOS.....	28
4.1. Caracterização da área de estudo	28
4.2. Relevância da linha de pesquisa pela bibliometria.....	31
4.3. Estimativa da produção de RSU em Maceió.....	32
4.3.1. Projeção populacional	32
4.3.1.1. Método Aritmético.....	32
4.3.1.2. Método Geométrico	33
4.3.1.3. Método Logístico	33
4.3.2. Produção <i>per capita</i> de RSU.....	34
4.3.3. Índice de atendimento pelos serviços de coleta	35
4.3.4. Massa de RSU recicláveis recolhidos via coleta seletiva	35
4.3.5. Projeção da produção de RSU encaminhados ao aterro sanitário.....	35
4.4. Potencial energético por meio do aproveitamento do biogás gerado pela disposição dos RSU em aterros sanitários	36
4.4.1. Teor de Carbono Orgânico Degradável	36
4.4.2. Potencial de geração de gás metano	37
4.4.3. Implantação dos dados na planilha LandGEM.....	38
4.4.4. Quantificação do potencial energético	39

4.5.	Potencial energético por meio da incineração dos RSU	39
4.5.1.	Poder calorífico Inferior do RSU de Maceió	39
4.5.2.	Quantificação do potencial energético da incineração	40
4.6.	Análise energética comparativa	40
4.7.	Avaliação da viabilidade técnico-econômica	41
4.7.1.	Custos e despesas.....	41
4.7.1.1.	Custos de investimento (Capex).....	41
4.7.1.1.1.	Recuperação energética do Biogás	42
4.7.1.1.2.	Recuperação energética pela incineração	42
4.7.1.2.	Custos de operação e manutenção (Opex)	43
4.7.1.2.1.	Recuperação energética do Biogás	43
4.7.1.2.2.	Recuperação energética pela incineração	43
4.7.2.	Receitas	44
4.7.2.1.	Venda da energia	44
4.7.2.2.	Créditos de carbono	44
4.7.3.	Indicadores econômicos.....	45
4.7.3.1.	Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	45
4.7.3.2.	Valor Presente Líquido (VPL)	45
4.7.3.3.	Taxa Interna de Retorno (TIR).....	46
4.7.3.4.	Tempo de Retorno de Capital (TRC).....	46
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
5.1.	Relevância da linha de pesquisa.....	48
5.2.	Projeção populacional	50
5.3.	Estimativa da produção de RSU em Maceió	53
5.4.	Potencial energético por meio do aproveitamento do biogás gerado pela disposição dos RSU em aterros sanitários	54
5.4.1.	Teor de carbono orgânico degradável e potencial de geração de gás metano 54	
5.4.2.	Quantificação do potencial energético do biogás	55
5.5.	Potencial energético por meio da incineração dos RSU	59
5.5.1.	Poder calorífico inferior do RSU de Maceió	59
5.5.2.	Quantificação do potencial energético da incineração	59
5.6.	Análise comparativa e avaliação técnica-econômica	61
5.7.	Avaliação econômica	62
5.7.1.	Custos	63
5.7.1.1.	Custos de investimentos.....	63
5.7.1.2.	Custos de operação e manutenção	64
5.7.2.	Receitas	66

5.7.2.1. Venda da energia	66
5.7.2.2. Créditos de carbono	68
5.7.3. Indicadores econômicos.....	69
5.7.3.1. Fluxo de caixa.....	69
5.7.3.2. Valor Presente Líquido (VPL)	71
5.7.3.3. Taxa Interna de Retorno (TIR).....	72
5.7.3.4. Tempo de Retorno de Capital (TRC)	72
6. CONCLUSÕES.....	75
REFERÊNCIAS.....	77

1. INTRODUÇÃO

O aumento na produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é uma consequência direta do crescimento populacional e das mudanças no padrão de consumo da sociedade, como afirma Layrargues (2016). Assim, a disposição final dos RSU representa uma das maiores preocupações ambientais do país, tendo em vista a necessidade de boas ferramentas de gestão e da aplicação de tecnologias adequadas ao local, que configurem uma maior viabilidade econômica e o menor impacto.

No estudo conduzido por Silva *et al.* (2020), realizado em Maceió - AL, percebeu-se uma geração *per capita* diária de RSU de 0,98 kg, estando este valor muito próximo à média nacional de 1,01 kg/hab.d, indicada pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2021).

Os processos de produção da grande parte dos elementos usados e consumidos pela sociedade possuem alta demanda energética. Neste sentido, a produção de energia a partir dos resíduos representa uma alternativa viável, tornando útil o material dispensado pela população. Dentre os métodos mais utilizados para a destinação dos RSU com recuperação energética, destacam-se: a disposição em aterros sanitários com coleta e aproveitamento do biogás gerado; a aplicação de biodigestores para a fração digerível anaerobicamente do resíduo com aproveitamento do biogás e a incineração com o uso do calor gerado na combustão (SILVA *et al.*, 2019).

A conversão energética dos RSU é influenciada não só pela tecnologia a ser adotada, mas também pelas condições do local, pelas características do resíduo gerado e por sua composição gravimétrica. O aproveitamento energético do biogás se dá em função da composição do gás, que por sua vez depende dos fatores supracitados. Para o caso da incineração, sabe-se que cada material presente nos RSU possui um poder calorífero inferior (PCI) específico, de modo que a produção de energia se dá em função de tal composição (EPE, 2008).

Como previsto no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2022), a adoção de sistemas de valorização do RSU possibilita o uso do resíduo para obtenção de energia, de modo que seja disposto somente rejeitos em aterro, após serem esgotadas todas as possibilidades de valorização, ainda assim, o plano, pontua que o

incentivo à captação e queima do biogás de aterros deve ser fortalecido, já que reduz emissões de gases causadores do efeito estufa e podendo gerar energia.

Para cada alternativa estudada, deve-se levar em consideração a viabilidade técnica, econômica e ambiental dos processos inerentes a ela. Buscar formas de utilização dos efluentes gasosos gerados no aterro, bem como outras formas de aproveitamento dos RSU, possibilita a criação de cenários, servindo como ferramenta de tomada de decisões para a otimização dos processos necessários ao aterro, bem como para gestão adequada dos RSU.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnico-econômica do potencial de aproveitamento energético dos RSU no município de Maceió – AL por meio de duas rotas tecnológicas: recuperação do biogás e incineração.

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar revisão de literatura e bibliometria acerca do tema;
- Selecionar os cenários de estudo para cada tecnologia;
- Calcular o potencial energético da recuperação dos RSU a partir das rotas tecnológicas escolhidas; e
- Realizar uma avaliação técnico-econômica dos potenciais energéticos levantados.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este tópico abordará os aspectos teóricos inerentes à linha de pesquisa e à temática do presente estudo.

3.1. Revisão de literatura e bibliometria

A revisão de literatura representa uma das etapas mais importantes da produção científica, já que é de fundamental importância reconhecer o arcabouço de conhecimento existente na área de interesse de qualquer área de estudo. De acordo com Macedo *et al.* (2010), a revisão bibliométrica diverge da revisão bibliográfica tradicional, já que esta abrange apenas uma visão geral sobre assuntos específicos, sendo usada como argumento para novas pesquisas, enquanto aquela permite que o pesquisador selecione e analise o território intelectual existente e formule uma questão de pesquisa, para desenvolver o corpo de estudos proposto.

Nesse sentido, a bibliografia estatística ou bibliometria é uma ferramenta que permite mapear e gerar diversos indicadores estatísticos e/ou quantitativos, que atua minimizando a subjetividade inerente à procura, ao tratamento e à gestão das informações científicas, contribuindo para tomadas de decisões e auxiliando a organização e sistematização de informações científicas e tecnológicas (GUEDES; BORSCHIVER, 2005).

Assim, o foco principal da análise bibliométrica é a utilização de métodos quantitativos na busca por uma avaliação objetiva da produção científica (ARAÚJO, 2006). Por meio da bibliometria é possível realizar uma revisão sistemática de literatura que permita conhecer os trabalhos mais influentes na mesma linha de pesquisa e assuntos emergentes; manusear muitas produções científicas de maneira simplificada e confiável e; analisar diferentes parâmetros acerca dos estudos, auxiliando e contribuindo diretamente no enriquecimento da análise do tema (TSAI *et al.*, 2020).

3.2. Caracterização dos Resíduos Sólidos de Maceió

A Superintendência de Desenvolvimento Sustentável (SUDES) de Maceió é a entidade responsável pela gestão dos RSU do município. A limpeza urbana consiste no conjunto de atividades que visam ao desenvolvimento e à sustentabilidade da

cidade, proporcionando organização e limpeza. Esse serviço engloba a coleta, o transporte e a destinação final dos RSU, bem como atividades de poda, capinagem e ações ambientais.

Na maior parte dos casos, os RSU da capital alagoana são recolhidos porta a porta. Quando isso não é possível, como em situações de difícil acesso, utilizam-se containers em locais estratégicos, nos quais a população escoar a sua produção de resíduos.

De acordo com a SUDES, tais serviços são realizados por duas empresas específicas: a Naturalle Tratamento de Resíduos LTDA e a Via Ambiental Engenharia e Serviços S/A. Cada uma opera nos locais de sua competência: a primeira na parte baixa da capital (lote 1) e a segunda majoritariamente na parte alta do município (lote 2).

Os resíduos são transportados por caminhões compactadores até o aterro sanitário de Maceió, que atualmente é operado pela empresa V2 Ambiental SPE S/A. Diferentemente das demais centrais do estado, onde se encaminham resíduos de mais de um município, essa unidade recebe os RSU apenas da capital. O funcionamento do aterro se deu a partir do ano de 2010, mesmo ano do fechamento do lixão da cidade, que se localizava no bairro Cruz das Almas, nas proximidades do atual Parque Shopping Maceió.

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2020), a composição gravimétrica dos resíduos sólidos é uma categorização dos tipos de materiais descartados pela população. Sua determinação é de extrema importância para a gestão integrada e eficiente dos resíduos, levando-se em consideração as melhores tecnologias disponíveis e aplicáveis, de acordo com a composição dos resíduos existentes permitindo assegurar uma destinação ambientalmente adequada preconizada pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS).

Sabe-se que a quantidade e composição dos RSU de um município varia de acordo com aspectos econômicos, sociais e culturais de cada local. Nos estudos conduzidos por Silva *et al.* (2020 e 2021), realizaram-se estudos gravimétricos dos resíduos encaminhados ao aterro sanitário de Maceió, com dados dos anos de 2017 e 2018, e uma categorização em orgânicos, recicláveis e rejeitos. Além disso, estimou-se a produção *per capita* de resíduos da capital alagoana. Desse modo, comparou-se tais resultados com estudos anteriores realizados no município, conforme explicitado na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1 – Comparativo da composição e geração *per capita* dos RSU de Maceió

Autores	Geração <i>per capita</i> (kg/(hab.dia))	Orgânico (%)	Reciclável (%)	Rejeito (%)
Farias e Souza (1996)	0,86	52,60	23,90	23,50
Jucá (2002)	1,35	50,00	34,00	16,00
Cunha (2005)	0,84	51,00	37,70	113,00
Tavares (2008)	0,90	56,60	25,50	17,90
Silva <i>et al.</i> (2020)	0,98	67,45	20,32	12,23
Silva <i>et al.</i> (2021)	0,59			

Fonte: Adaptado de SILVA *et al.*, 2021.

A determinação da geração *per capita* feita por Silva *et al.* (2020) baseou-se em informações da pesagem dos resíduos na chegada do aterro, compreendendo o período entre janeiro e dezembro de 2017, considerando a população de Maceió estimada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para este ano.

Já a determinação da produção *per capita* realizada por Silva *et al.* (2021) foi baseada nas mesmas informações das pesagens, mas considerando a massa do resíduo coletado em cada uma das oito regiões administrativas em que se dividem as rotas de coleta no município e a população fornecida pelos setores censitários do agrupamento de bairros envolvidos em cada região.

Conforme a Tabela 2, nota-se a predominância dos resíduos de origem orgânica nos diversos estudos realizados na região. Além disso, o aumento da fração de matéria orgânica nos estudos mais recentes pode ser observado, ao passo que a quantidade percentual de plástico duro reduziu. Este comportamento pode ser justificado pelo aumento da quantidade de resíduos reciclados e pelo emprego da coleta seletiva em alguns locais da capital que pode já se mostrar expressiva à nível municipal.

No entanto, quando contatada para mais informações, a SUDES pontuou que o material reciclado em todo o ano de 2021, aproximadamente 1.747,28 toneladas, foi inferior ao quantitativo de resíduos IIA e IIB que foram dispostos em 2 dias, em média, no aterro, indicando que não há significativa evidência de que o comportamento observado foi decorrente da reciclagem dos RSU.

Tabela 2 – Caracterização gravimétrica dos RSU em Maceió

Percentual dos componentes do RSU (%)					
Material	Farias e Souza (1996)	Jucá (2002)	Cunha (2005)	Tavares (2008)	Silva <i>et al.</i> (2020)
Papel/papelão	11,20	16,00	10,50	8,90	8,75
Madeira	0,60		2,30	0,50	1,51
Trapos	2,80	10,00	3,20	2,60	4,63
Couros/borracha	0,50		0,00	1,00	1,23
Plástico Duro	2,20		5,10	10,20	3,16
Plástico Mole	6,80	13,00	16,30	3,30	5,70
Latas/metals	2,20	3,00	2,70	1,80	2,03
Vidro	1,50	2,00	3,10	1,30	0,86
Terras/similares	18,80	0,00	5,10	13,80	0,83
Matéria Orgânica	52,60	50,00	51,00	56,60	67,19
Outros	0,80	6,00	0,70	0,00	5,10
Total	100	100	100	100	100

Fonte: Adaptado de SILVA *et al.*, 2021.

Neste estudo, as informações gravimétricas e de geração *per capita* dos resíduos serão de suma importância, tendo em vista que a recuperação energética dos RSU depende diretamente da sua composição, quantidade e demais características.

3.3. Rotas Tecnológicas

Dentre as diferentes tecnologias utilizadas para a destinação final adequada dos RSU, destacam-se as rotas tecnológicas que visam a recuperação energética dos resíduos, a exemplo da incineração e aproveitamento do biogás gerado pela disposição dos RSU em aterro sanitário, sendo estas as rotas analisadas no presente estudo.

3.3.1. Aproveitamento energético do biogás gerado

Acerca dessa temática, Freitas *et al.* (2019) colocaram como uma alternativa interessante a gestão integrada entre a geração de energia limpa e a coleta e a disposição dos RSU, por meio da utilização do biogás gerado nos aterros sanitários. Sendo assim, a estimativa do potencial teórico de aproveitamento energético do

biogás gerado em um aterro sanitário é relevante para possibilitar uma maneira viável de aproveitar os resíduos descartados pela população.

O biogás proveniente da digestão anaeróbia de RSU, consiste em uma mistura de gases, composta predominantemente por metano e dióxido de carbono. A porcentagem de cada componente do biogás depende diretamente das características gravimétricas do RSU; logo, suas concentrações típicas não são exatas, conforme ilustrado na Tabela 3 (SALOMON, 2007).

Tabela 3 – Composição média do biogás proveniente de RSU

Gases	Porcentagem (%)
Metano (CH ₄)	40-75
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25-40
Nitrogênio (N ₂)	0,5-2,5
Oxigênio (O ₂)	0,1-1
Ácido Sulfídrico (H ₂ S)	0,1-0,5
Amônia (NH ₃)	0,1-0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0-0,1
Hidrogênio (H ₂)	1-3

Fonte: SALOMON, 2007.

Segundo Ferreira (2018), além da composição dos RSU, a umidade, a granulometria e a idade do lixo, a temperatura e o pH são fatores fortemente influentes na produção de biogás em aterros sanitários. O autor pontua ainda que, devido a isso, o processo pode ser subdividido em cinco etapas, sintetizadas na Tabela 4.

Devido à possibilidade de aproveitamento do biogás para geração de energia, a inserção dos aterros sanitários neste mercado apresenta-se como promissora. Todavia, para que esta seja bem-sucedida, faz-se necessário analisar cuidadosamente o potencial energético do biogás gerado e a viabilidade econômica técnica e ambiental para cada situação.

Tabela 4 – Fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário

Fase	Condição	Descrição	Período Típico
I	Aeróbia	Logo após a cobertura dos RSU depositados em aterros sanitários ainda há oxigênio presente. Assim, os microrganismos aeróbios iniciam a decomposição, até que o oxigênio existente seja consumido, sem reposição.	Horas a 1 semana
II	Anóxica	Começam a predominar os chamados microrganismos anaeróbios facultativos, que atuam na conversão da matéria orgânica degradada (pelo processo aeróbio) em compostos dissolvidos por meio de hidrólise e liquefação.	3 meses a 3 anos
III	Anaeróbia instável	A matéria orgânica hidrolisada é transformada, por meio de ação bioquímica das bactérias presentes, em ácidos graxos voláteis.	8 a 40 anos
IV	Anaeróbia estável	Os ácidos já formados se misturam ao líquido proveniente da matéria orgânica, reduzindo seu pH e formando compostos orgânicos simples.	1 a 40 anos
V	Anaeróbia declinante	Bactérias metanogênicas consomem os compostos orgânicos simples, gerando metano (CH ₄) e dióxido de carbono (CO ₂).	10 a 80 anos

Fonte: Ferreira, 2018.

Destaca-se que os principais gases presentes no biogás gerados em um Aterro Sanitário são grandes causadores de impactos ambientais como o efeito estufa e a ocorrência de chuvas ácidas. Como visto na Tabela 3, o metano (CH₄) é o principal componente do biogás e possui um potencial de aquecimento global de 21 a até 25 vezes maior que o do dióxido de carbono (CO₂), principal gás de efeito estufa (FERNANDES *et al.*, 2018). A queima do biogás, mesmo sem o aproveitamento do calor gerado, reduz o impacto em termos de aquecimento global, sendo a recuperação energética do biogás uma forma mitigadora de impactos, que evitará o lançamento desses gases na atmosfera ao se obter energia elétrica.

3.3.2. Aproveitamento energético pela incineração dos Resíduos

A incineração é uma tecnologia para o tratamento dos resíduos que envolve a combustão das substâncias orgânicas presentes na matéria que compõe os resíduos, transformando-os basicamente em três produtos: cinzas, gases da combustão e calor (SANTOS, 2011).

Uma das alternativas para destinação final dos RSU é a incineração; neste caso, o calor produzido como consequência da queima dos componentes pode ser usado para fins de aquecimento, para produzir vapor e/ou energia elétrica. O processo de geração de energia elétrica a partir da incineração dos RSU é semelhante ao de usinas térmicas convencionais de ciclo Rankine, e sua capacidade de geração de energia depende diretamente da eficiência da transformação do calor em energia elétrica e do poder calorífico do material a ser incinerado (EPE, 2008).

As usinas de incineração de resíduos possuem a capacidade de gerar eletricidade de maneira permanente ao longo do dia, que por sua vez evita o acúmulo de RSU no local. De modo diferente de outros tipos de usinas térmicas, o rendimento na conversão para energia elétrica é relativamente baixo devido à restrição em se operar em temperaturas muito elevadas. A queima do RSU não deve ser feita a temperaturas superiores a 450°C, pois temperaturas superiores a esta podem ocasionar corrosão nos equipamentos. Nessas condições, uma usina pode ofertar entre 450 e 600 kWh por tonelada de RSU (EPE, 2008).

A incineração dos RSU é mais comumente utilizada em países da Europa e da Ásia, e, para tanto, diferentes técnicas podem ser empregadas. No Brasil, essa destinação é pouco utilizada, já que boa parte dos RSU ainda são destinados a lixões, e quando estes são fechados, há um emprego maior de aterros sanitários. As tecnologias de incineração apresentam diversas vantagens, como a redução da massa e volume de resíduos, a demanda de pouca área para implementação e possui maior potencial de recuperação energética se comparado a outras rotas tecnológicas (SILVA *et al.*, 2019).

A redução do volume de resíduos depositados em aterro sanitário é uma das principais vantagens das técnicas de incineração, reduzindo o volume dos resíduos entre 85 e 90% e não impede a recuperação dos metais recicláveis. Outrossim, as cinzas produzidas na incineração, apesar de conterem diversos poluentes, podem servir como matéria-prima para a produção de cimento do tipo Portland (EPE, 2008). Elas são, em sua maioria, formadas por constituintes inorgânicos que estavam presentes nos resíduos, podendo se aglomerar em nódulos sólidos ou serem carregadas pelos gases da combustão (SANTOS, 2011).

Por outro lado, ressalta-se que o processo de incineração exige cuidados especiais, como um tratamento adequado dos gases de combustão, já que a queima dos resíduos emite gases e material particulado. Esses representam grande

preocupação ambiental, sendo de extrema importância reduzir a concentração destes poluentes antes que sejam despejados na atmosfera (SANTOS, 2011).

Ademais, mesmo que uma usina de incineração atenda aos requisitos legais de emissões de poluentes, para sua implantação deve-se considerar a viabilidade econômica da planta, uma vez que demanda altos custos de investimento, operação e manutenção (EPE, 2008).

3.4. Avaliação técnico-econômica

Os estudos de viabilidade técnico-econômica são indispensáveis para a aplicação de projetos de saneamento (ANDRETTI *et al.*, 2021). De acordo com os autores é essencial que haja uma compreensão mais aprofundada da adequabilidade dos projetos de recuperação energética a partir dos RSU.

Nesse sentido, deve-se considerar as condições do local de implantação, bem como as demais especificidades e obstáculos a serem superados, de modo a evitar a aplicação de projetos que consumam recursos elevados e que possam não atender adequadamente os objetivos propostos.

A Portaria Interministerial nº 274/2019 (BRASIL, 2019) disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, e, no seu Art. 3º, a portaria reconhece a recuperação energética como uma forma de destinação ambientalmente adequada dos RSU. Outrossim, em seu Art.º 4 a legislação expressa que tal recuperação é condicionada a sua viabilidade técnica, ambiental, econômica e financeira:

“Art. 3º A recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos constitui uma das formas de destinação final ambientalmente adequada passível de ser adotada, observadas as alternativas prioritárias de não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, conforme estabelecido no caput e § 1º do art. 9º da Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010.

Art. 4º A recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos está condicionada à comprovação de sua viabilidade técnica, ambiental e econômico-financeira e à implantação de programa

de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental competente, nos termos da legislação em vigor.”

Segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2019), o vigor de uma planta de recuperação energética a partir do RSU recai sobre sua viabilidade econômica tanto para o investidor, quanto para a população. Desse modo, faz-se necessária a realização de uma análise econômica aplicada às rotas tecnológicas consideradas neste estudo.

Assim como relatado por Piñas (2016), partindo do conhecimento dos custos e das receitas, podem ser utilizados indicadores econômicos tradicionais como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e Tempo de Retorno de Capital (TRC) para que se conheça as limitações e aplicabilidade dos projetos.

3.4.1. Custos e despesas

Os custos e despesas reais de uma planta de recuperação energética de RSU dependem de uma ampla variedade de fatores, a exemplo da localização da instalação, do seu tamanho e capacidade, da condição do insumo, que reflete sobre o seu poder calorífico, do tipo de tecnologia empregado, dos métodos utilizados, da mão de obra e da manutenção necessárias, sendo as plantas de baixa capacidade relativamente mais caras que as de alta capacidade em termos de investimentos (CNI,2019).

3.4.1.1. Custos de investimento (Capex)

De acordo com Andretti *et al.* (2021), aplicado à recuperação energética dos RSU, o *Capital Expenditure* (Capex) é caracterizado pelas despesas de capital ou investimentos, e referem-se ao somatório dos custos relacionados ao planejamento e construção do projeto, sendo influenciado pela rota tecnológica a ser aplicada.

O Capex representa o montante de dinheiro despendido na aquisição, ou introdução de melhorias, de bens de capital de um determinado empreendimento (ALVES, 2019).

3.4.1.2. Custos de operação e manutenção (Opex)

O *Operational Expenditure* (Opex) representa os gastos no horizonte da vida útil do empreendimento, que contém estimativas dos principais componentes dos custos operacionais e despesas administrativas, considerando a prestação do serviço em regime de eficiência (ANDRETTI *et al.*, 2021). De modo simplificado, os custos Opex refletem valores fixos e variáveis relacionados à operação e manutenção de um sistema (EPE, 2021).

3.4.2. Receitas

As receitas representam a apuração econômica relativas à operação do empreendimento, no caso deste estudo, as principais receitas foram provenientes da venda de energia produzida para as duas rotas tecnológicas e pela venda de créditos de carbono para o caso da recuperação energética do biogás de aterro.

3.4.2.1. Venda da energia

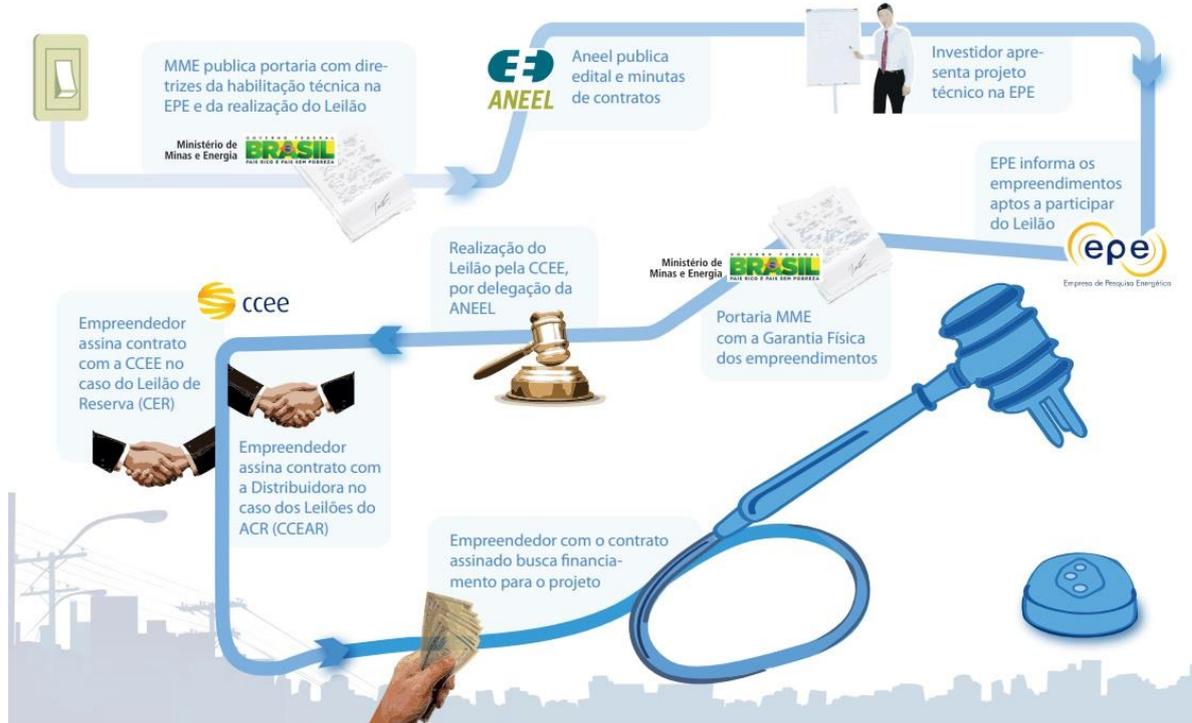
No Brasil, a comercialização de energia elétrica por parte dos geradores é realizada por meio de leilões periódicos. Neles, o preço de energia é bastante variável para diferentes tecnologias.

De acordo com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2022), os leilões são instrumentos de mercado que elevam a eficiência da contratação de energia, para fomentar o abastecimento da população com o menor custo, neles as negociações adotam o critério de menor tarifa para definir os vencedores, visando a modicidade tarifária.

A Figura 1 apresenta os principais processos inerentes aos leilões de energia.

Figura 1 – Processos de realização de leilões de energia

Como são realizados os leilões



Fonte: CCEE, 2022.

De acordo com Andretti *et al.* (2021), a redução da volatilidade do preço de venda de energia e a adequação da tarifa recebida por tonelada de RSU tratada são fatores críticos para a viabilidade econômica de projetos de recuperação energética, sendo consequência do modo de comercialização brasileiro, afetando diretamente a projeção de receitas para a viabilidade econômica.

3.4.2.2. Créditos de carbono

O crédito de carbono é um certificado emitido quando há redução de emissão de gases que provocam o efeito estufa e aquecimento global. Um crédito de carbono ou CBIO equivale a uma tonelada de CO₂ (dióxido de carbono) que deixou de ser emitido para a atmosfera. Aos outros gases reduzidos são emitidos créditos, partindo da equivalência entre cada gás e o CO₂ (MENEGUIN, 2012).

Cada CBIO corresponde a 7 árvores em termos de captura de carbono, sendo a empresa B3 S.A. responsável por disponibilizar o ambiente para emissão,

escrituração, registro, negociação e a aposentadoria do CBIO desde 2020 (MME, 2021).

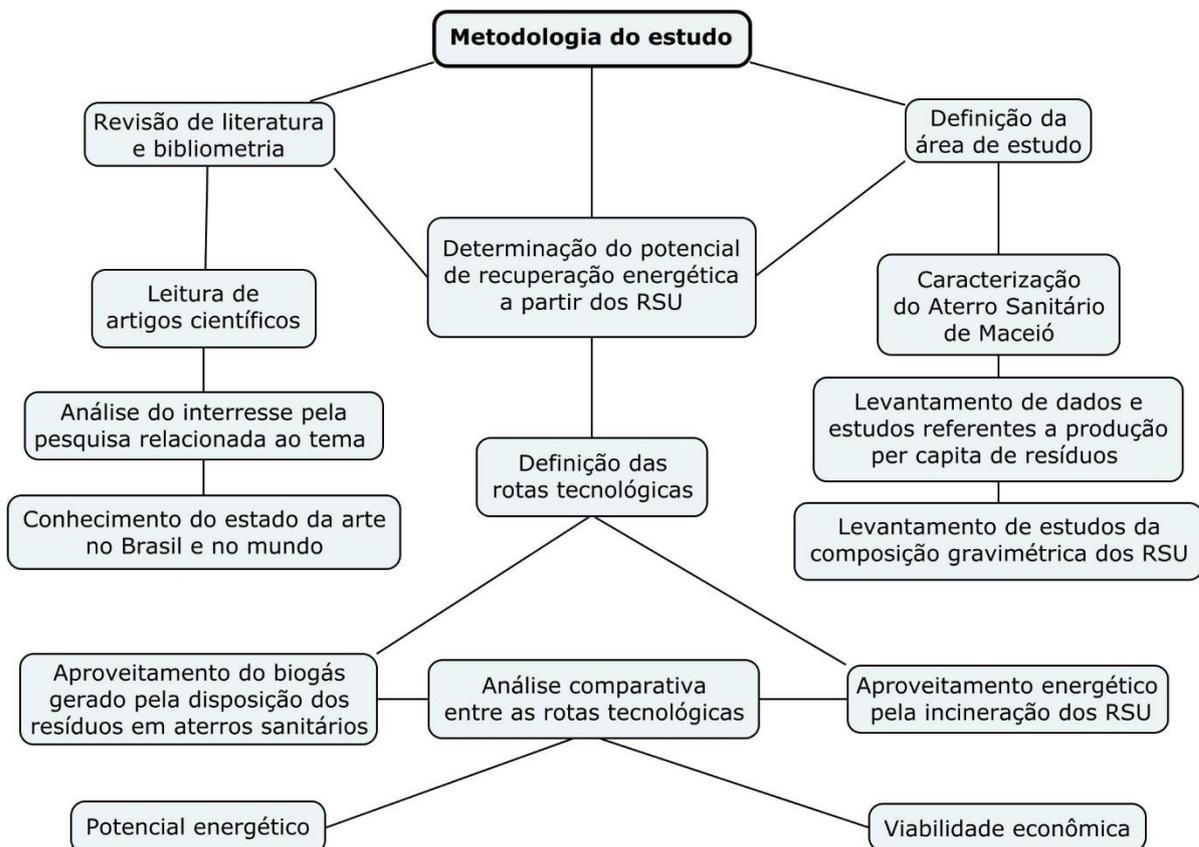
De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2022 (EPE, 2022), tendo como referência o ano de 2021, para cada MWh produzido pelo setor energético brasileiro, são emitidos em média 118,5 Kg de CO₂ equivalente, sendo esse quantitativo correspondente a 37% do valor emitido pela União Europeia, 27% do que é emitido pelos Estados Unidos e 15% do que é emitido pelo setor elétrico chinês, tal percentagem se deve ao fato do Brasil já possuir matriz energética predominantemente limpa, enquanto os demais países citados possuem grande dependência de combustíveis fósseis (EPE, 2022).

Como citado no item 3.3.1, o metano possui potencial causador de efeito estufa em até 25 vezes superior ao efeito causado pelo dióxido de carbono. Assim, a sua queima seguida aproveitamento energético possui significância em termos de créditos de descarbonização, pois além de produzir energia a partir dos RSU, o processo de recuperação energética reduz o potencial de aquecimento global do gás, sendo os créditos passíveis de comercialização, como pontuado por Andrade (2022) em seu estudo. Desse modo, a venda dos créditos de carbono pode ser somada às receitas provenientes da venda de energia produzida pela queima do biogás, favorecendo a aplicabilidade desse tipo de tecnologia em centros de tratamento de resíduo.

4. MÉTODOS

A Figura 2 apresenta o fluxograma geral do procedimento metodológico do presente estudo.

Figura 2 – Fluxograma geral da metodologia do estudo



Fonte: Autor, 2022.

4.1. Caracterização da área de estudo

O município de Maceió está localizado no litoral do Estado de Alagoas, limitando-se ao Norte com os municípios de Paripueira e São Luís do Quitunde, ao Sul com Marechal Deodoro e Barra de São Miguel, ao Leste com o Oceano Atlântico e ao Oeste com os municípios de Rio Largo, Satuba, Santa Luzia do Norte e Coqueiro Seco (IBGE, 2022).

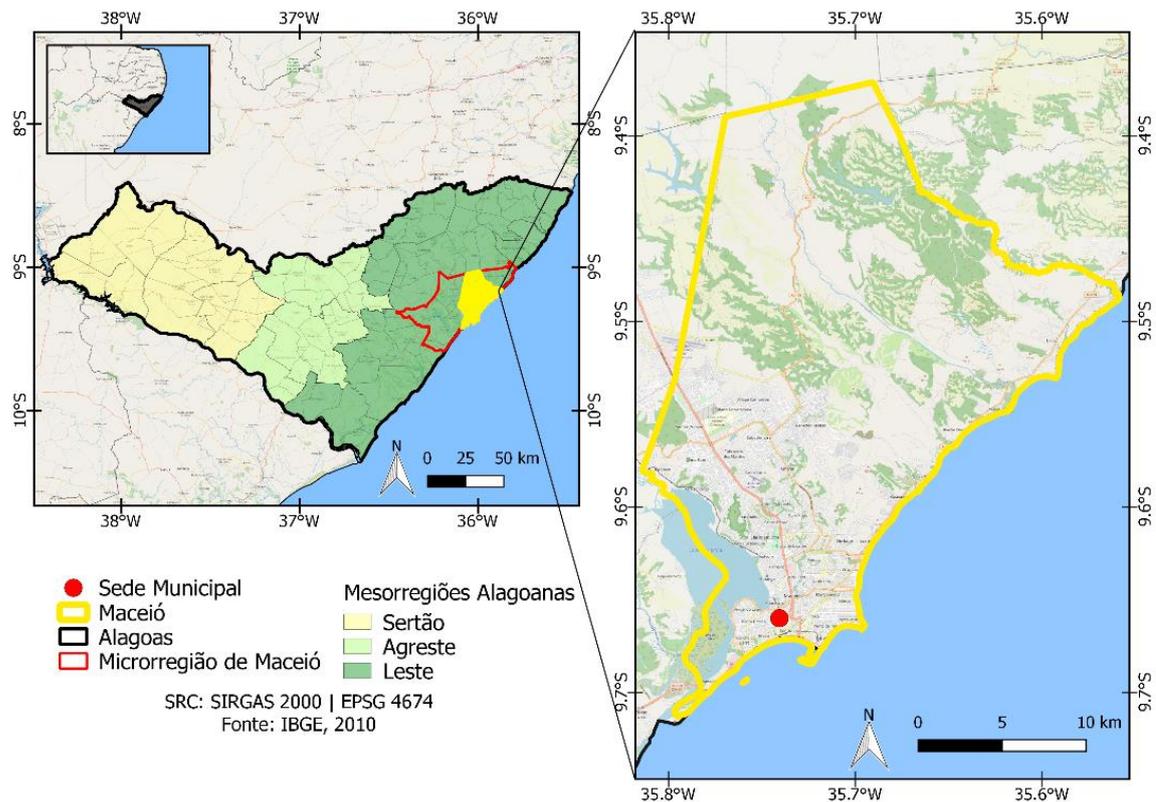
Segundo dados fornecidos pelo último Censo Demográfico do IBGE, que ocorreu em 2010, Maceió possuía 932.748 habitantes, com uma população estimada para 2021 de 1.031.597 habitantes. Situado numa altitude de até 300, o município possui uma área de 509,320 km² e densidade demográfica de 1854,10 hab/km². A

área municipal está inserida na mesorregião do Leste Alagoano, na microrregião de Maceió, conforme o mapa da Figura 3.

Dentre as principais atividades econômicas do município destacam-se os setores industriais, por meio da indústria química de extração de sal-gema, açucareiras e de álcool, de cimento e alimentícias, além da agricultura, pecuária e extração de gás natural e petróleo. Outrossim, a cidade possui expressivas atividades turísticas e hoteleiras, tendo em vista, sobretudo, as belezas naturais da zona costeira do município.

A sede do município tem uma altitude de aproximadamente 16 m e está localizada na Latitude $09^{\circ} 39' 57''\text{O}$ e Longitude $35^{\circ} 44' 07''\text{S}$.

Figura 3 – Localização de Maceió



Fonte: Autor, 2022.

Atualmente, a capital alagoana destina seus RSU ao aterro sanitário de Maceió, que foi projetado para funcionar por vinte anos e localiza-se no bairro Benedito Bentes, em uma região localmente pouco povoada na parte alta da cidade, com coordenadas geográficas de $9^{\circ}33'44,11''\text{O}$ de latitude e $35^{\circ}41'28,20''\text{S}$ de longitude, conforme visto na Figura 4.

Com uma área aproximada de 114 ha, o aterro sanitário iniciou seu funcionamento no dia 30 de abril de 2010, com o fechamento do antigo lixão de Maceió. O acesso à central se dá pelo litoral norte ou por meio do bairro Benedito Bentes (ARAÚJO, 2019).

Figura 4 – Localização do aterro sanitário de Maceió



Fonte: Autor, 2022.

O RSU produzido na capital alagoana não possui características fixas. As quantidades dos materiais que o compõem variam de acordo com diversos fatores, como os aspectos socioeconômicos, culturais, geográficos, climáticos e sazonais das regiões, podendo apresentar características distintas em diferentes regiões de um mesmo município, como comprova o estudo de Silva *et al.* (2021).

Para a determinação da composição gravimétrica dos RSU, comumente se utiliza da metodologia do quarteamento. Neste sentido, a norma ABNT/NBR 10.007 de 2004 estabelece a metodologia adequada para uma caracterização eficiente dos resíduos. Neste método a amostragem é realizada por um processo de divisão em quatro partes iguais de uma quantidade pré-homogeneizada de resíduos, em que são

escolhidas duas partes opostas entre si para constituir uma nova amostra que são misturadas totalmente, sendo este processo repetido até que se obtenha o volume desejado para quantificação da fração de cada componente do resíduo.

No entanto, para o presente estudo, os dados que dizem respeito ao aterro sanitário e gravimetria dos RSU foram obtidos por meio de dados secundários fornecidos em estudos realizados e publicados sobre o tema na área de estudo.

4.2. Relevância da linha de pesquisa pela bibliometria

Para a identificação da relevância da temática do presente estudo, realizou-se uma análise bibliométrica, em que foram prospectadas as bases de dados *Scopus* (Elsevier) e *Web of Science*. O procedimento de busca destas bases para consulta foi realizado a partir do acesso remoto ao conteúdo assinado do Portal de Periódicos (CAPES) via Comunidade Acadêmica Federada (CAFe).

As duas bases de dados escolhidas estão entre as mais utilizadas mundialmente, uma vez que possuem uma gama de diferentes dados e utilizam de diferentes métricas, consistindo em ferramentas de grande utilidade para estudos bibliométricos, fomentando uma preciosa ajuda nos trabalhos acadêmicos (Costa *et al.*, 2012).

Como um critério de escolha da base de dados para a identificação das características da área de estudo, consultaram-se nas duas plataformas - por título, resumo e palavras-chave - as *strings* “*Solid Waste Disposal*” e “*Waste to Energy*”, que significam na língua portuguesa “Destinação dos Resíduos Sólidos e “Resíduos para Energia”, usando o conectivo “*AND*”, que realiza a interseção dos resultados para os termos de busca em questão.

O termo *Waste to Energy* (WTE) é uma denominação genérica para qualquer rota tecnológica ou processo de tratamento dos resíduos e que obtenha energia a partir deles (SANTOS, 2011). Assim, os cenários abordados no presente estudo são formas de processamento WTE.

Aplicado os dados de entrada nestas bases, escolheu-se aquela em que se obteve maior quantidade de publicações retornadas. Posteriormente, os dados estatísticos disponibilizados pela base foram exportados para o programa *Microsoft Excel*, permitindo assim a construção de gráficos que expressam características e tendências da linha de pesquisa do presente trabalho, a nível nacional e mundial.

4.3. Estimativa da produção de RSU em Maceió

Os dados de produção de RSU para o período de atividade do aterro sanitário são indispensáveis para o cálculo da recuperação energética ano a ano da área de estudo. Estes quantitativos determinaram, em proporção, a quantidade de energia a ser potencialmente produzida, pois quanto maior a produção de resíduos, maiores serão os insumos para conversão energética.

Neste sentido, este item abordará as metodologias utilizadas no presente trabalho que culminou na estimativa de RSU produzido pelo município de Maceió e encaminhado ao aterro sanitário ao longo de sua vida útil.

4.3.1. Projeção populacional

Em primeiro plano, prospectaram-se três métodos matemáticos básicos comumente utilizados em projeções populacionais: o método Aritmético (A); o método Geométrico (G); e o método Logístico (L). Os métodos matemáticos trazem uma projeção futura em números de habitantes baseadas em equações matemáticas em que seus parâmetros de entrada consistem em dados demográficos conhecidos e fatídicos (TSUTIYA, 2006).

Cada uma destas metodologias pode demonstrar-se mais aplicável à área de estudo ou não. Para o presente trabalho, a escolha da estimativa que melhor se aplica à Maceió foi condicionada ao padrão histórico de crescimento de habitantes da capital alagoana e abrangência do método. Considerando a vida útil prevista do aterro sanitário de 20 anos, sendo 2010 o ano de início de seu funcionamento, a projeção populacional teve como horizonte de estudo o ano de 2030. Os dados populacionais de entrada foram extraídos dos últimos três censos demográficos realizados pelo IBGE (1991, 2000 e 2010).

4.3.1.1. Método Aritmético

O método de projeção populacional aritmético prevê uma taxa de crescimento constante ao longo dos anos, baseando-se no comportamento de crescimento ou decrescimento entre dois dados populacionais. Para este método utilizou-se das Equação 1 e 2, em conformidade com o descrito por Tsutiya (2006).

$$P = P_2 + K_a * (T - T_2) \quad (1)$$

$$K_a = \frac{P_2 - P_1}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

Em que a variação da população (P), no ano T é dada em função da constante (K_a), dada por P₁, que é a população do penúltimo censo, ocorrido no ano T₁, neste caso 2000, e por P₂, que é a população do último censo, ocorrido no ano T₂ (2010).

Ainda de acordo com Tsutiya (2006), esse método faz a população projetada variar linearmente, sendo mais utilizado para curtos períodos, uma vez que para projeções mais longas as estimativas encontradas tendem a ficar mais dispersas da realidade histórica, uma vez que é um método ilimitado.

4.3.1.2. Método Geométrico

O método geométrico leva em consideração a mesma porcentagem de crescimento populacional para iguais períodos. A projeção populacional pode ser calculada pelas Equações 3 e 4, utilizando-se do logaritmo neperiano (TSUTIYA, 2006).

$$P = P_2 * e^{K_g(T-T_2)} \quad (3)$$

$$K_g = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{T_2 - T_1} \quad (4)$$

Em que a estimativa da população (P), no ano T é dada em função da taxa de crescimento geométrico (K_g), dada por P₁, que é a população do penúltimo censo, ocorrido no ano T₁, neste caso 2000, e por P₂, que é a população do último censo, ocorrido no ano T₂ (2010).

Nota-se que tanto para o método aritmético quanto para o método geométrico, utilizam-se apenas dois dados demográficos do IBGE, referentes aos anos de 2000 e 2010.

4.3.1.3. Método Logístico

Para o método logístico, considera-se que a população cresce assintoticamente para um valor limite de saturação em função do tempo, em que se considera que a população tende a estabilização após um período de crescimento mais acelerado, considerando as possíveis limitações futuras do município. (TSUTIYA, 2006). Para este caso, utilizou-se as Equações 5, 6, 7 e 8 para se chegar aos valores estimados.

$$P = \frac{K}{1+e^{a-bT}} \quad (5)$$

$$K = \frac{2P_0P_1P_2 - P_1^2(P_0+P_2)}{P_0P_2 - P_1^2} \quad (6)$$

$$b = -\frac{1}{0,4343d} * \log \frac{P_0(K-P_1)}{P_1(K-P_0)} \quad (7)$$

$$a = \frac{1}{0,4343} * \log \frac{K-P_0}{P_0} \quad (8)$$

Em que a projeção da população (P), no ano T é expressa em função: da população de saturação (K), dada por P₀, que é a população do antepenúltimo censo demográfico, do ano T₀, neste caso 1991, por P₁, que é a população do penúltimo censo, ocorrido no ano T₁, neste caso 2000, e por P₂, que é a população do último censo, ocorrido no ano T₂ (2010); da constante b, expressa em função de d, que é o intervalo entre os anos T₀, T₁ e T₂, que diz respeito a quantidade de anos entre os censos demográficos de 10 anos; e da constante a.

Para que este método seja viável de aplicação, deve-se obedecer P₀<P₁<P₂ e P₀*P₂< P₁², condições que foram satisfeitas para o presente estudo.

Nota-se que diferentemente das demais metodologias descritas, a curva logística considera dados de entrada de três censos demográficos do IBGE (1991, 2000, 2010).

No estudo de Penner *et al.* (2019), quando aplicado ao município de Belém, capital do estado do Pará, o método logístico apresentou maior precisão em relação ao método aritmético e ao método geométrico, em que foi apontado justamente o fato de que a maior quantidade de dados levados em consideração para a projeção foi determinante para a maior relevância do método.

4.3.2. Produção *per capita* de RSU

Como visto no item 3.2, no estudo de Silva *et al.* (2020), com dados de pesagem do aterro sanitário de Maceió referentes ao ano de 2017, chegou-se a uma taxa de geração de RSU per capita de 0,98 kg/hab.d. No entanto, com dados atualizados para 2020, o SNIS (2021), indicou que para Maceió, essa produção é de 1,03 kg/hab.d, sendo este valor, por ser mais atual, considerado no presente estudo.

4.3.3. Índice de atendimento pelos serviços de coleta

De acordo com o SNIS (2021), a taxa de cobertura regular do serviço de coleta de RSU em relação à população total do município de Maceió é de 99,93%, porcentagem a ser considerada no presente estudo, uma vez que a recuperação energética será condicionada à quantidade de RSU produzida que chega ao aterro sanitário.

4.3.4. Massa de RSU recicláveis recolhidos via coleta seletiva

O município de Maceió possui uma massa per capita de materiais recicláveis recolhidos via coleta seletiva de 1,51 kg/hab.ano (SNIS, 2021). Este valor representa apenas 0,4% do RSU produzido por uma pessoa anualmente, no entanto no presente estudo ele foi considerado, uma vez que a reciclagem reduz a quantidade de RSU produzido que chega ao aterro sanitário.

4.3.5. Projeção da produção de RSU encaminhados ao aterro sanitário

Desse modo, considerando todas as variáveis expostas nos itens anteriores, foi possível realizar a estimativa da quantidade de resíduos produzidos e encaminhadas ao aterro sanitário de Maceió nos anos previstos para o seu funcionamento, conforme descreve as Equações 9 e 10. Esses dados são indispensáveis para cálculo do potencial de recuperação energética do resíduo.

$$RSU_{prod} = Pop * Prod_{pc} * 365 \quad (9)$$

$$RSU_{enc} = RSU_{prod} * I_{coleta} - M_{reciclada} \quad (10)$$

Em que a produção de resíduos em kg/ano (RSU_{prod}) é dada pelo produto da população estimada (Pop) em número de habitantes e a produção de RSU *per capita* ($Prod_{pc}$) em kg/hab.d *365 d/ano.

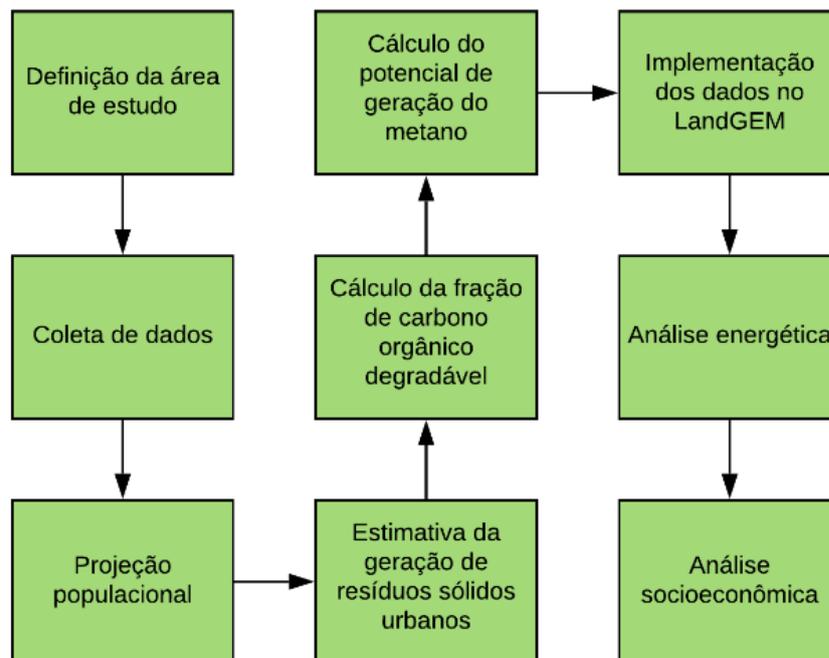
A produção de resíduos em kg/ano encaminhados ao aterro (RSU_{enc}), equivale ao produto da produção de RSU em kg/ano (RSU_{prod}) e a taxa de cobertura de coleta (I_{coleta}) em porcentagem, subtraído da massa reciclada em kg/hab.ano ($M_{reciclada}$).

4.4. Potencial energético por meio do aproveitamento do biogás gerado pela disposição dos RSU em aterros sanitários

Para o cálculo do potencial energético por meio do aproveitamento do biogás gerado pela disposição dos RSU em aterros sanitários, usaram-se como dados de entrada: a projeção da quantidade de resíduos encaminhadas ao aterro, com metodologia descrita no item 4.3; a composição gravimétrica mais recente prevista na Tabela 2; o cálculo da fração de carbono orgânico degradável; e o potencial de geração de metano, úteis para construção da análise energética.

Este tópico de estudo seguirá o fluxo de trabalho ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Representação das etapas a serem desenvolvidas



Fonte: Autor, 2022.

4.4.1. Teor de Carbono Orgânico Degradável

A partir dos dados da gravimetria, disponíveis na Tabela 3, foi possível calcular o valor do Carbono Orgânico Degradável (COD). Ele consiste na fração do carbono dos RSU que é acessível à decomposição bioquímica, sendo estimado com base na composição dos resíduos. Assim, o COD pode ser calculado a partir do teor de carbono de vários componentes degradáveis do fluxo de resíduos da área de estudo, como visto na Equação 11.

$$COD = \sum(COD_i \times W_i) \quad (11)$$

Nela, tem-se que o COD é dado em termos de $[(Gg \text{ de } C)/(Gg \text{ de } RSU)]$; W_i refere-se à fração do tipo de resíduo i no RSU em estudo, que depende dos resultados da análise da composição gravimétrica do resíduo; e COD_i refere-se à fração em massa de carbono orgânico degradável no tipo de resíduo i , que depende da composição do material que será encaminhado ao aterro, sendo foram definidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006) como visto na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores típicos de COD_i para os componentes do RSU.

Componente	COD_i (% em massa)
A: Papel/Papelão	40
B: Resíduos de parques e jardins	17
C: Restos de alimento	15
D: Têxteis	40
E: Madeira	30

Fonte: IPCC (2006)

Desse modo, os componentes presentes na gravimetria da Tabela 3 (SILVA *et al.*, 2020) foram associados, quando possível, aos componentes da Tabela 5, tornando possível realizar a quantificação do COD.

4.4.2. Potencial de geração de gás metano

A determinação do valor do COD possibilitou o cálculo do potencial de geração de metano do resíduo sólido (L_0). De acordo com o estudo de Humberto (2017) o cálculo do L_0 pode ser realizado por meio da Equação 12 definida pelo IPCC, (2006).

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_f \times F \times \frac{16}{12} \quad (12)$$

Por meio dela, L_0 é calculado em termos de $[(Gg \text{ de } CH_4)/(Gg \text{ de } RSU)]$; FCM é o fator de correção de metano (%); COD é o carbono orgânico degradável, em $[(Gg \text{ de } C)/(Gg \text{ de } RSU)]$, calculado segundo a metodologia do item anterior; COD_f é fração de COD dissociada (%); F é a fração do volume do metano no biogás gerado (%) e $16/12$ é o fator de conversão de carbono em metano $[(Gg \text{ de } CH_4)/(Gg \text{ de } C)]$.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, devido à disponibilidade limitada de estudos nesta linha de pesquisa, optou-se por adotar os valores de $FCM = 1$ e $COD_f = 0,5$.

No entanto, para o valor da fração do volume de metano no biogás (F), foi considerado um valor de 56,86% de metano, indicado pelo estudo de Silva (2020), realizado na mesma área de estudo e em conformidade com o intervalo percentual de metano explícito na Tabela 3. Assim, foi possível quantificar o potencial de geração de metano dos RSU de Maceió.

4.4.3. Implantação dos dados na planilha LandGEM

De posse da determinação da estimativa de geração de RSU por ano da população da área de estudo, projetada para os 20 anos previstos de funcionamento do aterro sanitário, em termos de megagramas por ano (Mg/ano) e da mensuração do valor do potencial de geração de metano do resíduo sólido (L_0) em termos de (m^3/Mg) foi possível alimentar a ferramenta LandGEM. O período analisado foi de 2010 - ano de inauguração do aterro - até 2030 – ano em que está previsto o fim da vida útil do aterro.

Para a determinação do valor de L_0 em (m^3/Mg de RSU) foi necessária uma análise dimensional, na qual foi utilizado o valor da densidade do metano - 0,671 Kg/m^3 (LINDE, 2020) - tendo em vista que o valor de L_0 estava inicialmente em termos de $[(Gg \text{ de } CH_4)/(Gg \text{ de } RSU)]$.

A ferramenta LandGEM, conforme descrito por Santos *et al.* (2020), é executada na plataforma *Microsoft Office Excel*, criada pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) com a finalidade de mensurar a produção dos gases emitidos nos aterros sanitários.

De acordo com Assunção (2015), o modelo é baseado no Método de Decaimento de Primeira Ordem, que considera a cinética de decomposição do RSU ao longo dos anos de funcionamento do aterro sanitário e após o seu encerramento, considerando que, a cada ano, novas quantidades de resíduos são depositadas.

A partir da inserção dos dados de entrada descritos, a plataforma disponibilizou a quantidade estimada de geração de metano por ano no aterro sanitário, bem como confeccionou gráficos com estas informações, possibilitando melhores análises.

4.4.4. Quantificação do potencial energético

O resultado obtido pelo uso do LandGEM forneceu a quantidade de metano produzido anualmente no aterro (em m^3CH_4/ano), mesmo após o seu provável ano de fechamento, em 2030. Posteriormente, realizou-se a conversão energética, considerando valores de Poder Calorífico Inferior do metano $PCI_{CH_4} = 35,53 MJ/m^3$ e da eficiência do motor de combustão interna ($E_f=0,3$, para cada ano.

Dessa forma, calculou-se a potência disponível em KW e MW e a energia disponível em KWh/ano a partir dos dados de geração de metano, para os primeiros 20 anos de produção energética significativa. neste caso até o ano de 2031, uma vez que o LandGEM considera que no primeiro ano não há produção de metano expressiva.

4.5. Potencial energético por meio da incineração dos RSU

Para o cálculo do potencial energético por meio da incineração, também se utilizou a estimativa de RSU destinados ao aterro municipal a cada ano, conforme a metodologia do item 4.3 e a gravimetria mais recente da Tabela 2. Além disso, calculou-se o PCI do resíduo e posterior quantificação do potencial energético.

4.5.1. Poder calorífico Inferior do RSU de Maceió

Pôde-se calcular o PCI do resíduo produzido em Maceió por meio dos valores de PCI de cada item da composição gravimétrica (EPE, 2008). Ademais, essa quantificação pode ser obtida pela Equação 13, formulada em estudo de Themelis e Kaufman (2003) com base em estatísticas levantadas em pesquisas de campo.

$$PCI = [18500 \times Y_{combustível} - 2636 \times Y_{H_2O} - 628 \times Y_{vidros} - 544 \times Y_{metais}] \div 4,185 \quad (13)$$

Nela, as variáveis $Y_{combustível}$, Y_{H_2O} , Y_{vidros} e Y_{metais} representam a proporção de cada elemento em um kg de RSU. Para o caso da fração Y_{H_2O} , como não foram encontrados estudos com esse tipo de especificidade na área de estudo, considerou-se um valor típico de 60% de teor de água para as frações orgânicas presentes no RSU, conforme a recomendado por EPE (2008).

Ainda de acordo com a EPE (2008), para $PCI < 1.675 Kcal/kg$, a incineração não é tecnicamente viável, pois, além das dificuldades técnicas, é necessária a adição de um combustível auxiliar no sistema. Para PCI entre $1675 Kcal/kg$ e $2.000 Kcal/kg$,

a viabilidade técnica da incineração ainda depende de algum tipo de pré-tratamento que eleve o PCI. Já para $PCI > 2.000$ Kcal/kg de RSU, a queima bruta é tecnicamente viável, sendo que usinas de incineração podem chegar entre 450 e 700 kwh por tonelada de resíduo.

Assim, para o cálculo do PCI do resíduo, usou-se a Equação 13 e verificou-se posteriormente a sua faixa de viabilidade. Na Tabela 6 estão apresentados os PCI para os principais materiais que são comumente encontrados nos RSU, em que é possível constatar que resíduos de natureza orgânica tendem a apresentar menores valores de poder calorífico.

Tabela 6 – Poder calorífico de materiais encontrados nos RSU

Material	Kcal/kg
Plásticos	6300
Borracha	6780
Couro	3630
Têxteis	3480
Madeira	2520
Alimentos	1310
Papel	4030

Fonte: EPE, 2008.

4.5.2. Quantificação do potencial energético da incineração

Partido da estimativa da quantidade de resíduos encaminhadas ao aterro sanitário de Maceió, do PCI calculado conforme metodologia do item anterior e da eficiência do motor de combustão interna $E_f = 0,3$, feitas as devidas análises dimensionais, foi possível quantificar o potencial de recuperação energética da incineração dos RSU da área de estudo.

Dessa forma, calculou-se a potência disponível em Kcal/h e MW e a energia disponível em (KWh/ano) a partir dos dados de geração de metano, para os primeiros 20 anos de produção.

4.6. Análise energética comparativa

Utilizando dados de consumo energético *per capita* anual de 1.176 KWh/hab.ano para o estado de Alagoas, fornecidos pelo Anuário Estatístico de

Energia Elétrica (EPE, 2021) e a energia disponível pela recuperação energética do resíduo, estimou-se a quantidade de habitantes que poderiam ser beneficiados caso acontecesse o aproveitamento energético do biogás produzido e pela incineração dos RSU encaminhados ao aterro sanitário de Maceió.

Assim, construíram-se gráficos com os valores energéticos teóricos adquiridos e população a ser potencialmente atendida, aplicados ao horizonte de projeto do aterro sanitário, nos quais foi possível comparar o comportamento de produção energética aplicada a cada rota tecnológica.

4.7. Avaliação da viabilidade técnico-econômica

Após o levantamento dos potenciais de recuperação energética por meio das rotas tecnológicas estudadas foi realizada uma análise da viabilidade teórica das rotas descritas, aplicadas ao caso de Maceió. O modelo de análise econômica seguido no presente trabalho baseou-se na análise dos potenciais de investimentos e receitas inerentes a cada caso ao longo da vida útil do aterro.

Para o caso da incineração, utilizaram-se dados entre os anos de 2010 e 2030, que corresponde ao período exato em que o aterro receberá RSU. Para o caso do aproveitamento do biogás, considerou-se o período entre 2011 e 2031, pois, de acordo com os valores retornados pela ferramenta LandGEM, no primeiro ano de funcionamento não há produção de biogás significativa, sendo o ano após o fechamento do aterro (2031) o que possuirá maior volume de gases emitidos.

Para fins de cálculo, no presente estudo considerou-se o valor do dólar americano sendo equivalente a R\$ 4,82, valor este referente ao dia 01 de junho de 2022 (EXCHANGE-RATES, 2022).

4.7.1. Custos e despesas

Neste item serão abordados os processos metodológicos adotados no presente estudo para obtenção dos custos e despesas teóricas inerentes as rotas tecnológicas estudadas.

4.7.1.1. Custos de investimento (Capex)

No presente estudo, os custos relacionados aos investimentos inerentes às tecnologias foram buscados na literatura em termos de Capex.

4.7.1.1.1. Recuperação energética do Biogás

Para o cenário da recuperação energética do biogás em aterro sanitário, aplicaram-se duas metodologias que retornaram valores de investimento semelhantes. A primeira metodologia seguiu a Equação 14, proposta por Silva *et al.* (2017); nela, o valor do custo de investimento para implantação do sistema em um aterro é dado em dólar americano e P é a potência teórica média de aproveitamento da planta em MW:

$$\text{Custo}(\$) = 4 \times 10^6 \times P(\text{MW}) + 258,311 \quad (14)$$

A segunda metodologia de cálculo para o Capex para o biogás foi remetente ao valor de referência listado no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2030 (EPE, 2021), que indica um Capex referência por unidade de potência, de 19.600 R\$/KW.

4.7.1.1.2. Recuperação energética pela incineração

Para o caso da incineração o valor do Capex foi extraído do guia de recuperação energética de RSU para tomadores de decisão (CNI, 2019), que estimou o valor do Capex em milhões de dólares americanos de acordo com a quantidade de resíduos a serem processados, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Valores Capex para incineração

Capacidade (t/ano)	Capex (Milhões de dólares)	Fonte
100.000	45,5	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
200.000	77,2	
300.000	114	
500.000	173,9	
600.000	210,5	
700.000	241,6	

Fonte: adaptado de CNI, 2019.

Ao observar a quantidade de RSU a ser encaminhada ao aterro sanitário, tem-se uma média de 382.863 toneladas anuais. Desse modo, na ausência de valor de referência próximo, utilizou-se do valor Capex para uma capacidade de 300.000 toneladas anuais de RSU, equivalendo a 114 milhões de dólares, como se vê na Tabela 7. Vale destacar que a oferta de estudos de viabilidade econômica de

incineração de resíduos é escassa para o Brasil, pois a técnica é pouco difundida em território nacional.

4.7.1.2. Custos de operação e manutenção (Opex)

No presente estudo, os custos relacionados à manutenção e à operação inerentes às tecnologias estudadas foram buscados na literatura em termos de Opex.

4.7.1.2.1. Recuperação energética do Biogás

Para o cenário da recuperação energética do biogás em aterro sanitário, o cálculo do Opex se deu por meio do valor de referência listado no PDE 2030 (EPE, 2021), que indica um Opex referência por unidade de potência anual, 600 R\$/KW/ano, valor que reflete a soma dos gastos (custos e despesas) fixos e variáveis da operação e manutenção do sistema.

4.7.1.2.2. Recuperação energética pela incineração

Para o caso da incineração o valor do Opex foi extraído do guia de recuperação energética de RSU para tomadores de decisão (CNI, 2019), que estimou o valor em dólares americanos por tonelada de resíduo de acordo com a quantidade de resíduos a serem processados, conforme a Tabela 8. Desse modo, obteve-se o valor Opex para cada ano de funcionamento do aterro sanitário.

Tabela 8 – Valores Opex para incineração

Capacidade (t/ano)	Opex (\$/t.RSU)	Fonte
100.000	8,8	EPEM S.A. (PALEOLOGOS; ECONOMOPOULOS; RAMBOW, 2006)
200.000	14	
300.000	17,6	
500.000	24,6	
600.000	27,2	
700.000	30,7	

Fonte: adaptado de CNI, 2019.

Sob a mesma justificativa expressa no item 4.7.1.1.2, utilizou-se do valor Opex para uma capacidade de 300.000 toneladas anuais de RSU (valor mais próximo à média de geração em Maceió), equivalendo a 17,6 dólares por tonelada de resíduo, como se vê na Tabela 8.

4.7.2. Receitas

Como informado no item 3.4.2, as principais receitas relacionadas as duas tecnologias estudadas consistem na venda de eletricidade produzida para os dois cenários e pela venda de créditos de carbono para o caso da recuperação energética do biogás de aterro.

4.7.2.1. Venda da energia

A venda de energia renovável brasileira é feita por meio de leilões de energia elétrica, conforme explícito no item 3.4.2.1. Para o presente estudo, no que diz respeito ao cenário do aproveitamento energético do biogás, considerou-se o valor de venda de energia de 251,00 R\$/MWh, previsto no 23º Leilão de Energia Nova A-5, ocorrido em 29 de abril de 2016 (EPE, 2016). Esse valor refere-se a um empreendimento de produção de energia por meio de biogás, usado como referência também no estudo de Silva *et al.* (2017).

Para o cenário da incineração, o Leilão de energia nova A-5 de 2021, ocorrido no dia 30 de setembro, foi o primeiro que contratou um projeto de geração de energia elétrica a partir de RSU por meio da incineração direta, com um preço médio de 549,4 R\$/MWh (EPE, 2021). Sendo Assim, utilizou-se deste valor, que representa mais que o dobro do valor que foi aplicado ao cenário do biogás, expresso no parágrafo acima.

4.7.2.2. Créditos de carbono

Os créditos de descarbonização aplicam-se sobretudo no cenário da recuperação energética do Biogás, uma vez que o CH₄ - gás mais presente no biogás em conformidade com a Tabela 3 - possui potencial efeito estufa superior em até 25 vezes em relação ao CO₂, que é o principal gás que causa este efeito (FERNANDES *et al.*, 2018). Assim, o volume de CH₄, a ser queimado pela recuperação energética, estimado ao longo do tempo pelo aterro sanitário foi revertido em toneladas CO₂ equivalente (CBIO) para cada ano, utilizando do seu peso específico de 0,000671 t/m³ (LINDE, 2020).

O valor de venda de créditos de carbono considerado no presente estudo foi de 202,65 R\$/CBIO, relativo ao dia 30 de junho de 2022 (DATAGRO, 2022).

Assim estimou-se as receitas anuais teóricas provenientes da comercialização dos créditos de carbono, pelo produto do valor de referência e as toneladas de dióxido de carbono equivalentes reduzidas.

4.7.3. Indicadores econômicos

Com o levantamento do fluxo de caixa, que se deu por meio do levantamento de entradas e saídas de receitas e despesas no período descrito para os dois cenários, utilizou-se de indicadores econômicos comumente utilizados para análise de viabilidade de projetos e tomadas de decisão. Os indicadores utilizados foram: o VPL; a TIR e o TRC ou Payback, conforme também utilizado por Piñas (2016).

4.7.3.1. Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) pode ser conceituada como a taxa mínima em que um empreendedor se propõe a ganhar quando se faz um investimento, a partir dela é que se considera que um projeto está apresentando lucro financeiro (PIÑAS, 2016). Neste estudo, para fins de cálculo, adotou-se uma TMA equivalente a 12%, valor equivalente ao considerado por Silva *et al.* (2017) em seu trabalho.

4.7.3.2. Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL é um indicador de viabilidade econômica de um projeto, considerando seu investimento inicial e fluxo de caixa, além de utilizar-se da TMA. Quando se tem mais de um cenário, o VPL retorna qual é o mais rentável. Junto a outros indicadores, ele atua auxiliando na tomada de decisões (FREITAS, 2019).

Matematicamente, o VPL pode ser expresso por meio da Equação 15 (LIMA, 2019):

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - FC_0 \quad (15)$$

Na qual:

FC_t = fluxos de caixa dos valores envolvidos que ocorrem em n períodos

i = TMA;

FC_0 = Investimento inicial;

n = número de períodos envolvidos no fluxo de caixa;

Quando o valor do VPL de um projeto é positivo, ele gera receitas suficientes para pagar os juros e obter lucratividade, representando viabilidade e atratividade,

quando o valor é negativo têm-se que o projeto não se paga, pois é inviável e não atrativo, quando o VPL é igual a zero, o projeto deve-se ser rejeitado por ser indiferente (LIMA, 2019).

4.7.3.3. Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR de um projeto é aquela que iguala o fluxo de caixa operacional ao valor a ser investido no projeto, ou seja, ela iguala o VPL a zero. Quanto maior a TIR, melhor será o projeto, devendo ser superior à TMA (LIMA, 2019). Assim, ela pode ser achada igualando a Equação 16 a zero, conforme expressa a Equação 4:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} - FC_0 = 0 \therefore FC_0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \quad (16)$$

Na qual:

FC_t = fluxos de caixa dos valores envolvidos que ocorrem em n períodos

FC_0 = Investimento inicial;

n = número de períodos envolvidos no fluxo de caixa;

Em conformidade com Freitas (2019), a TIR de um investimento é importante pois mensura o risco, que pode ser visualizado por meio da proximidade dela com a TMA, de modo que:

TIR > TMA → Atrativo

TIR < TMA → Não atrativo

TIR = TMA → Indiferente

4.7.3.4. Tempo de Retorno de Capital (TRC)

O TRC ou Payback é o tempo necessário para que o fluxo operacional de caixa do projeto recupere o valor a ser investido em um projeto (LIMA, 2019). Segundo Piñas (2016), ele pode ser obtido por dois pontos de vista diferentes, um deles gera o tempo de retorno de capital não descontado (Payback simples), e outro retorna o tempo de retorno de capital descontado (Payback descontado).

O Payback simples não considera as flutuações do valor do dinheiro no tempo, já que não se baseia em valores descontados, sendo calculado somando o último ano em que houve saldo negativo à razão entre o último saldo negativo e o fluxo de caixa do ano em equilíbrio (FREITAS, 2019).

Já o Payback descontado representa o número de períodos que zera o VPL do projeto, levando em conta a TMA, ele consiste em calcular valores de VPL para valores crescentes de número de períodos e verificar qual valor “n” iguala o valor presente líquido à zero, conforme Equação 17 e pode expressar-se segundo a equação 4 (PIÑAS, 2016):

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - FC_0 = 0 \therefore FC_0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (17)$$

Na qual:

FC_t = fluxos de caixa dos valores envolvidos que ocorrem em n períodos

FC_0 = Investimento inicial;

i = TMA;

n = número de períodos envolvidos no fluxo de caixa (Payback descontado).

Destaca-se que o valor de Payback descontado só existirá para projetos de VPL maior ou igual a zero.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item serão abordados os resultados adquiridos com a aplicação dos processos metodológicos previstos no item 3.

5.1. Relevância da linha de pesquisa

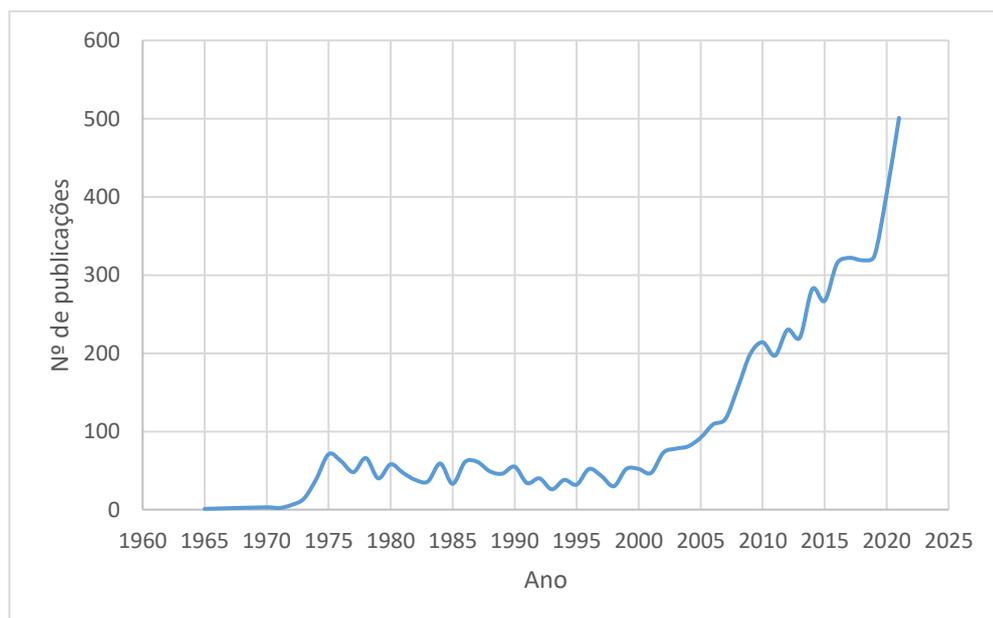
A busca descrita no item 4.2 retornou 6.042 publicações para a base de dados *Scopus* e 3.237 publicações na base de dados *Web of Science*, indicando maior relevância da primeira base para a temática do presente estudo, já que foi obtido um retorno maior em número de publicações relacionadas.

A base de dados do *Scopus* reúne periódicos revisados por pares publicados em revistas científicas de diversas áreas e tem sido a base mais utilizada para fins de análise de bibliometria (SANTOS, 2021).

Portanto, usou-se como referência a base de dados *Scopus*, para verificação do número de publicações na linha de pesquisa ao longo do tempo em escala mundial e nacional, além da determinação dos países mais atuantes na temática.

No gráfico da Figura 6 apresenta-se o cenário mundial de estudos relacionados à linha de pesquisa do presente trabalho, em que se nota um crescente interesse, iniciado na década de 70 e ultrapassando 500 publicações por ano em 2021.

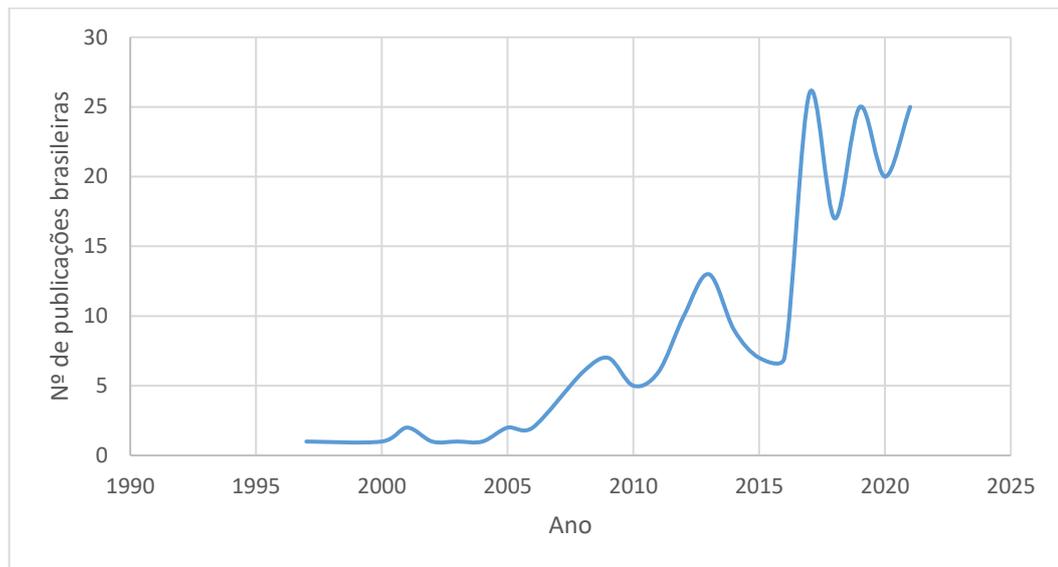
Figura 6 – Cenário mundial da linha de pesquisa



Fonte: Autor, 2022.

Já o gráfico da Figura 7 expressa o quantitativo de publicações relacionadas ao presente estudo e aplicadas ao cenário nacional, onde também se nota um crescente interesse iniciado com uma publicação em 1997 e culminando em 26 publicações nacionais no ano de 2017.

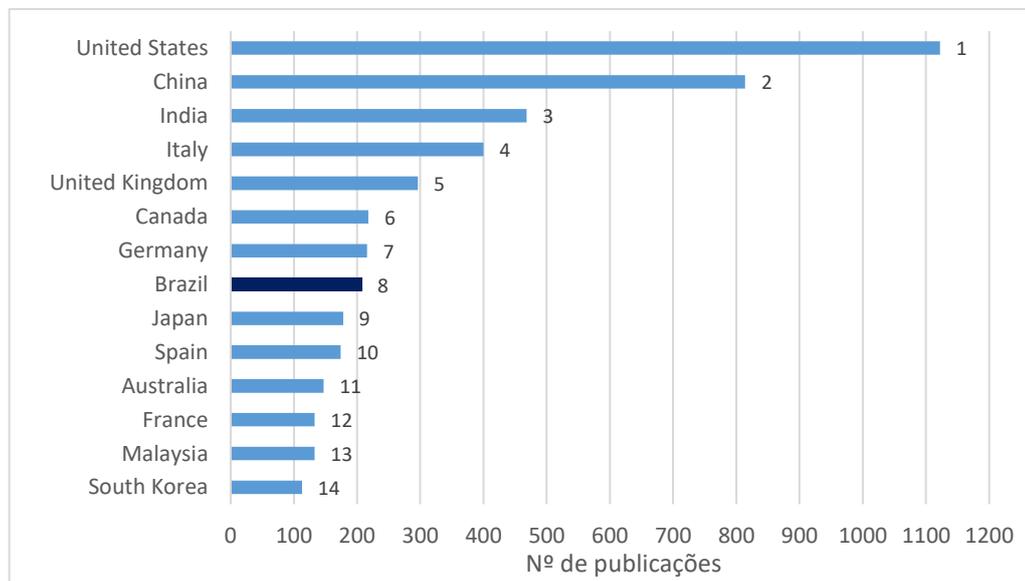
Figura 7 – Cenário nacional da linha de pesquisa



Fonte: Autor, 2022.

No entanto, entre as 6.042 publicações retornadas pela base *Scopus*, apenas 207 são brasileiras. O gráfico da Figura 8 expõe o *ranking* de países que mais publicam estudos relacionados a linha de pesquisa do presente trabalho.

Figura 8 – Países com maior número de publicações na linha de pesquisa



Fonte: Autor, 2022.

Nele, destacam-se os Estados Unidos, com 1.122 publicações, seguido de China (814), Índia (468) e Itália (400). Nesta classificação, o Brasil ocupa o 8º lugar.

Assim, para além do panorama quantitativo sobre o tema, foi realizada a leitura de artigos científicos selecionados pelo autor, de modo a fomentar e auxiliar a elaboração das demais etapas do presente estudo ao fornecer subsídios às discussões.

5.2. Projeção populacional

A Tabela 9 apresenta os dados da população de Maceió usados no presente estudo, referentes aos três últimos censos demográficos realizados pelo IBGE.

Tabela 9 – População de Maceió nos últimos 3 Censos Demográficos do IBGE

Censos IBGE	População total (habitantes)
1991	629.041
2000	797.759
2010	932.748

Fonte: IBGE, 1991; 2000; 2010.

Com o objetivo de se obter a projeção populacional de Maceió para o período de funcionamento do aterro sanitário, partiu-se dos dados populacionais extraídos do IBGE, em que, por meio da metodologia descrita no item 4.3.1, foram mensurados os valores das constantes dos três métodos matemáticos avaliados, apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores das constantes para a projeção populacional

Método Matemático	Constante	Valor
Aritmético (A)	K_A	13.499
Geométrico (G)	K_G	0,0156
Logístico (L)	K	1.163.460
	b	0,0617
	a	-0,1630

Fonte: Autor, 2022.

Dessa forma, realizou-se as projeções populacionais para os métodos matemáticos: aritmético (A), geométrico (G) e logístico (L), para o intervalo entre os anos de 2010 e 2030, conforme apresenta a Tabela 11.

Tabela 11 – Projeções populacionais (2010-2030)

Ano	Pop. Estimada (A)	Pop. Estimada (G)	Pop. Estimada (L)
2010	932.748	932.748	932.748
2011	946.247	947.444	943.944
2012	959.746	962.372	954.722
2013	973.245	977.535	965.082
2014	986.744	992.936	975.029
2015	1.000.243	1.008.581	984.569
2016	1.013.741	1.024.472	993.711
2017	1.027.240	1.040.613	1.002.462
2018	1.040.739	1.057.008	1.010.831
2019	1.054.238	1.073.662	1.018.828
2020	1.067.737	1.090.579	1.026.463
2021	1.081.236	1.107.761	1.033.746
2022	1.094.735	1.125.215	1.040.688
2023	1.108.234	1.142.943	1.047.300
2024	1.121.733	1.160.951	1.053.594
2025	1.135.232	1.179.243	1.059.581
2026	1.148.730	1.197.823	1.065.271
2027	1.162.229	1.216.695	1.070.678
2028	1.175.728	1.235.865	1.075.811
2029	1.189.227	1.255.337	1.080.682
2030	1.202.726	1.275.116	1.085.302

Fonte: Autor, 2022.

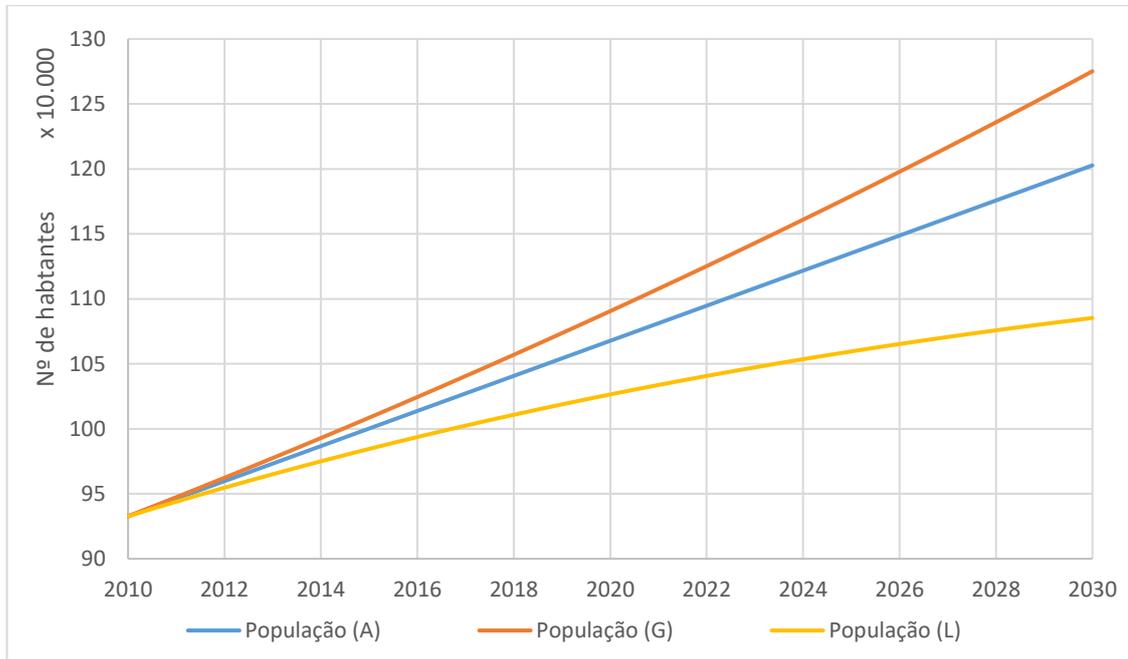
Dessa forma, de modo a tornar os resultados da Tabela 11 mais visíveis, construiu-se o gráfico apresentado na

Figura 9. Nele, nota-se o comportamento de cada estimativa ao longo dos anos.

Já a Figura 10 apresenta graficamente, para além das estimativas populacionais, os dados históricos de população do IBGE, previstos na Tabela 9.

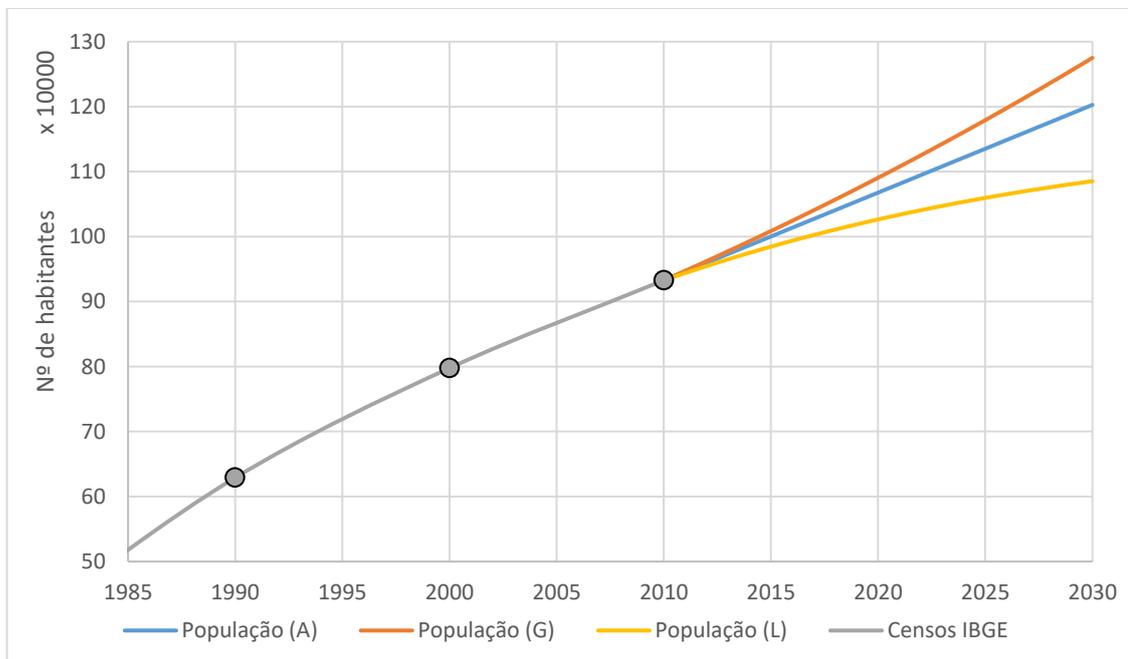
Nela é possível analisar qual das projeções populacionais avaliada melhor se adequa à tendência histórica da capital.

Figura 9 – Gráfico de comparativo entre os métodos de projeção



Fonte: Autor, 2022.

Figura 10 – Histórico de números de habitantes (IBGE) e projeções populacionais



Fonte: Autor, 2022.

Tendo em vista os resultados apresentados nas Figura 9 e na Figura 10, observa-se que a projeção que melhor se adequa a tendência apontada pelos censos demográficos é a do método Logístico.

Além disso, este foi o único método dentre os avaliados que considerou três dados demográficos em seu cálculo e uma população de saturação. Sendo assim, esta projeção (L) foi escolhida para o prosseguimento do presente estudo.

5.3. Estimativa da produção de RSU em Maceió

Em conformidade com a metodologia descrita no item 4.3.5, considerando a população estimada pelo método logístico e a geração *per capita* de resíduo, chegou-se à estimativa de RSU produzido em Maceió. Juntamente com o índice de atendimento de coleta e a massa de recicláveis recolhidos, foi estimada a quantidade de resíduos que chegam ao aterro ao longo de sua vida útil. Tais estimativas estão dispostas na Tabela 12.

Tabela 12 – Estimativa de produção de RSU em Maceió (2010-2030)

Ano	Pop. Estimada (L)	Prod. Resíduos (t/ano)	Prod. Resíduos encaminhadas ao aterro (t/ano)
2010	932.745	350.665,4	349.011,5
2011	943.944	354.875,9	353.202,1
2012	954.722	358.927,7	357.234,9
2013	965.082	362.822,5	361.111,2
2014	975.029	366.562,1	364.833,2
2015	984.569	370.148,9	368.403,1
2016	993.711	373.585,7	371.823,7
2017	1.002.462	376.875,7	375.098,1
2018	1.010.831	380.022,0	378.229,7
2019	1.018.828	383.028,5	381.221,9
2020	1.026.463	385.898,7	384.078,6
2021	1.033.746	388.636,7	386.803,7
2022	1.040.688	391.246,6	389.401,3
2023	1.047.300	393.732,5	391.875,5
2024	1.053.594	396.098,7	394.230,5
2025	1.059.581	398.349,3	396.470,5
2026	1.065.271	400.488,8	398.599,9
2027	1.070.678	402.521,3	400.622,8
2028	1.075.811	404.451,1	402.543,5
2029	1.080.682	406.282,4	404.366,2
2030	1.085.302	408.019,3	406.094,9

Fonte: Autor, 2022.

5.4. Potencial energético por meio do aproveitamento do biogás gerado pela disposição dos RSU em aterros sanitários

Neste item serão apresentados os resultados referentes ao potencial de recuperação energética do biogás gerado pela disposição dos RSU de Maceió em aterro sanitário.

5.4.1. Teor de carbono orgânico degradável e potencial de geração de gás metano

Conforme a metodologia estabelecida no item 4.4.1, realizou-se o cálculo do COD. Na gravimetria de Silva *et al* (2020), considerada no presente estudo, os RSU foram separados nas seguintes composições, em porcentagem: papel/papelão; madeira; trapos; couros/borracha; plástico duro; plástico mole; latas/metais; vidro; terras/similares; matéria orgânica e outros. Esta classificação, porém, difere da estabelecida pelo IPCC em 2006, ilustrada na Tabela 5. Sendo assim, foram considerados os componentes que são comuns ou equivalentes nas duas fontes. Dessa forma, foram desconsiderados no cálculo de COD as frações de: couros/borracha; plástico duro; plástico mole; latas/metais; vidros; e outros, já que não possuem teor de carbono degradável considerável.

Desse modo, foi necessário apenas o cálculo dos valores de W_i a partir de uma média ponderada, resultando nos valores explícitos na Tabela 13. Nesta também está o valor calculado do COD a partir da Equação 11. Nota-se que o valor do COD calculado (16,02%) se aproxima consideravelmente do valor sugerido pelo IPCC em caso de ausência de estudos acerca da gravimétrica do resíduo, que é de 12% (SALOMON, 2019).

Tabela 13 – Cálculo da Fração de carbono orgânico degradável no lixo

Componente	COD_i (IPCC)	Gravimetria (W_i)
Papel/Papelão	40%	8,75%
Resíduos de parques e jardins	17%	0,83%
Matéria Orgânica	15%	67,19%
Têxteis	40%	4,63%
Madeira	30%	1,51%
	COD(%)	16,02%

Fonte: Autor, 2022.

Por meio da Equação 12, seguindo a metodologia descrita no item 4.4.2, determinou-se o valor para o potencial de geração de metano do resíduo sólido (L_0), utilizando o valor calculado do COD, obtendo-se $L_0 = 0,0534 [(Gg \text{ de } CH_4)/(Gg \text{ de } RSU)]$. Este valor foi convertido em m^3/Mg , resultando em aproximadamente $L_0 = 81,43 m^3/Mg$.

5.4.2. Quantificação do potencial energético do biogás

Para o cálculo da estimativa de emissão de gás metano, foi utilizada a planilha LandGEM, conforme definido no item 4.4.3. A ferramenta retornou os valores de emissão de metano durante e após o funcionamento do aterro sanitário de Maceió. A Tabela 14 apresenta a estimativa de produção de metano em m^3CH_4/ano , gerada pela plataforma entre os anos de 2010 e 2150.

Nota-se que nos primeiros anos de funcionamento do aterro ocorrem um maior crescimento de emissão de CH_4 , devido à grande taxa de deposição de RSU nestes anos. Segundo Silva (2009), quanto maior a quantidade de RSU aterrados, mais eficiente e rápido é o processo de digestão anaeróbia. Outrossim, para o primeiro ano de funcionamento do aterro, a ferramenta não considera a produção de metano como significativa.

Tabela 14 – Estimativa da produção de gás metano (2010-2050)

Ano	Resíduos encaminhados ao aterro (Mg/ano)	Produção de metano (m^3/ano)
2010	349.011,47	-
2011	353.202,12	563.316,72
2012	357.234,87	1.122.242,88
2013	361.111,23	1.676.610,56
2014	364.833,18	2.226.257,60
2015	368.403,10	2.771.028,26
2016	371.823,73	3.310.773,71
2017	375.098,14	3.845.352,51
2018	378.229,68	4.374.630,95
2019	381.221,92	4.898.483,39
2020	384.078,63	5.416.792,44
2021	386.803,74	5.929.449,10
2022	389.401,31	6.436.352,91
2023	391.875,48	6.937.411,92
2024	394.230,47	7.432.542,69

Ano	Resíduos encaminhados ao aterro (Mg/ano)	Produção de metano (m³/ano)
2025	396.470,51	7.921.670,25
2026	398.599,87	8.404.727,95
2027	400.622,79	8.881.657,32
2028	402.543,50	9.352.407,93
2029	404.366,15	9.816.937,13
2030	406.094,88	10.275.209,88
2031	0,00	10.727.198,43
2032	0,00	10.514.785,67
2033	0,00	10.306.578,97
2034	0,00	10.102.495,03
2035	0,00	9.902.452,22
2036	0,00	9.706.370,53
2037	0,00	9.514.171,52
2038	0,00	9.325.778,30
2039	0,00	9.141.115,52
2040	0,00	8.960.109,30
2041	0,00	8.782.687,25
2042	0,00	8.608.778,39
2043	0,00	8.438.313,16
2044	0,00	8.271.223,36
2045	0,00	8.107.442,17
2046	0,00	7.946.904,06
2047	0,00	7.789.544,81
2048	0,00	7.635.301,49
2049	0,00	7.484.112,39
2050	0,00	7.335.917,04

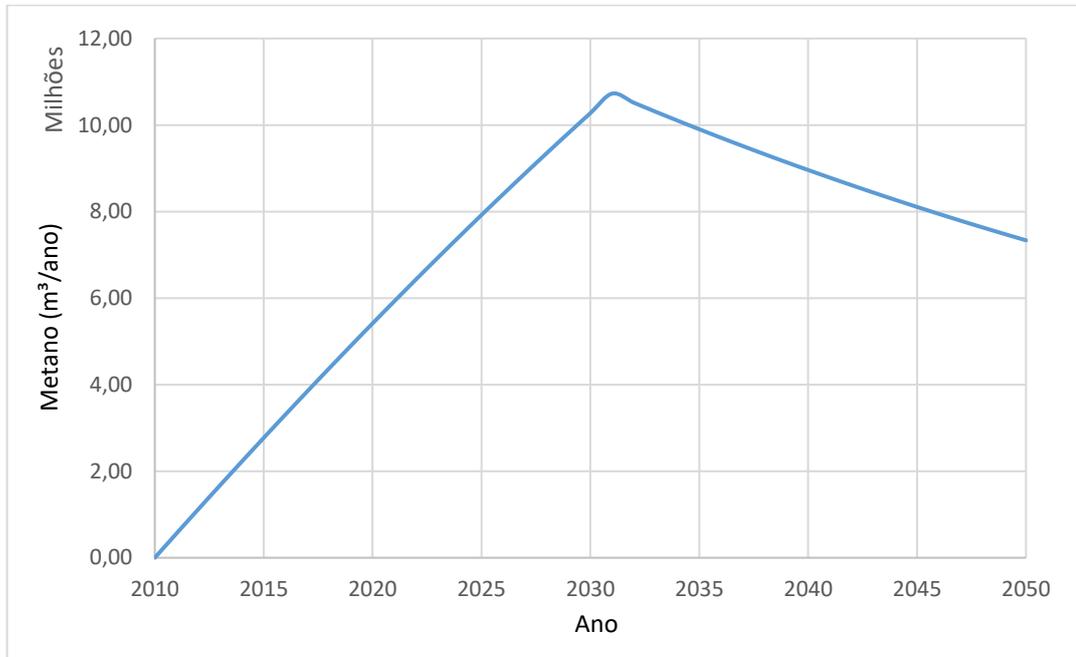
Fonte: Autor, 2022.

Após o fechamento do aterro, é evidenciado que a produção de metano começará a decair, pois o aporte de RSU na unidade cessará. Ainda assim, o aterro sanitário continuará produzindo grandes quantidades de metano, passíveis de aproveitamento energético, após o seu período de atividade. Porém, com o passar de muitos anos, as emissões tendem a se tornar insignificantes em termos de geração de energia elétrica.

Considerando que a produção de biogás é diretamente proporcional à quantidade de resíduos aterrados, como esperado, o valor máximo de emissão de gás metano se deu por volta do ano de 2031, chegando ao valor de 10.727.198,43m³

CH₄/ano. O fenômeno ocorre logo após o fechamento do aterro, pois espera-se que, no último ano de funcionamento, o aterro receba as maiores cargas de RSU e que toda a matéria orgânica em decomposição depositada nos anos anteriores ainda produza biogás. Tal realidade está expressa graficamente na Figura 11.

Figura 11 – Valores de emissão de gás metano



Fonte: Autor, 2022.

Com os valores da emissão de metano em m³/ano, no período entre 2010 e 2050 foi feito o cálculo da potência da energia disponível, conforme a metodologia descrita no item 4.4.4.

De acordo com o consumo médio *per capita* de energia elétrica e os valores anuais de potência disponível, calculou-se o número de habitantes atendidos, caso houvesse o aproveitamento energético do biogás produzido no aterro sanitário de Maceió. Os resultados destes cálculos estão registrados na Tabela 15.

Para manter o mesmo horizonte para os dois cenários em estudo, considerou-se os primeiros 20 anos de produção energética, para o biogás, esse período compreende os anos entre 2011 e 2031.

Tabela 15 – Estimativa do potencial energético para o aproveitamento do biogás

Ano	Potência Disponível (KW)	Energia Disponível (kwh/ano)	Habitantes atendidos (Hab)
2010	-	-	-
2011	190,40	1.667.886,92	1.418
2012	379,31	3.322.774,12	2.825

Ano	Potência Disponível (KW)	Energia Disponível (kwh/ano)	Habitantes atendidos (Hab)
2013	566,69	4.964.164,42	4.221
2014	752,46	6.591.577,72	5.605
2015	936,59	8.204.552,85	6.977
2016	1.119,02	9.802.649,17	8.336
2017	1.299,71	11.385.447,89	9.682
2018	1.478,60	12.952.553,15	11.014
2019	1.655,66	14.503.592,92	12.333
2020	1.830,85	16.038.219,60	13.638
2021	2.004,12	17.556.110,54	14.929
2022	2.175,45	19.056.968,24	16.205
2023	2.344,81	20.540.520,45	17.466
2024	2.512,16	22.006.520,15	18.713
2025	2.677,48	23.454.745,34	19.945
2026	2.840,75	24.884.998,66	21.161
2027	3.001,95	26.297.107,05	22.361
2028	3.161,06	27.690.921,14	23.547
2029	3.318,07	29.066.314,70	24.716
2030	3.472,97	30.423.183,91	25.870
2031	3.625,74	31.761.446,69	27.008
Média	1.879,27	16.462.375,26	14.665

Fonte: Autor, 2022.

Como pode-se observar na Tabela 15, o ano de maior produção de potência e energia disponível é 2031, que é proporcional ao comportamento observado na Figura 11 em relação à emissão de CH₄.

Considerando o ano de maior produção (2031), estima-se que, se houvesse o aproveitamento energético do gás metano neste ano, a energia elétrica gerada seria suficiente para abastecer uma população de, aproximadamente, 27.008 habitantes com uma potência teórica de aproximadamente 3,6 MW.

Por outro lado, considerando os valores teóricos médios dos primeiros 20 anos de produção energética, seria possível suprir as necessidades de energia elétrica de uma população de 14.665 habitantes, com uma potência média anual de 1,88 MW, valores a serem comparados com aqueles obtidos pela incineração posteriormente.

5.5. Potencial energético por meio da incineração dos RSU

Neste item serão apresentados os resultados referentes ao potencial de recuperação energética por meio da incineração dos RSU de Maceió em aterro sanitário.

5.5.1. Poder calorífico inferior do RSU de Maceió

A formulação do PCI descrita no item 4.5.1 leva em consideração: a fração combustível ($Y_{combustível}$), que reúne a fração dos componentes da Tabela 6 (plásticos, borracha, couro, têxteis, madeira, alimentos e papel); a fração de água (Y_{H_2O}) – correspondente a 60% do volume dos componentes putrescíveis (alimentos e madeira), descontados da fração combustível; e a fração de vidros (Y_{vidros}) e metais (Y_{metais}), correspondentes as suas porcentagens na composição gravimétrica inicial.

Assim, foram obtidos os valores destas frações e o PCI resultante, expressos na Tabela 16.

Tabela 16 – Poder Calorífico Inferior do RSU de Maceió

$Y_{combustível}$ (%)	50,95
Y_{H_2O} (%)	41,22
Y_{vidros} (%)	0,86
Y_{metais} (%)	2,03
PCI (kcal/kg)	1.989

Fonte: Autor, 2022.

Como o valor do PCI do RSU foi de 1.989 kcal/kg, sendo inferior a 2.000 kcal/kg e superior a 1.600 kcal/kg, de acordo com a EPE (2008), a viabilidade técnica da incineração ainda depende de algum tipo de pré-tratamento que eleve o PCI.

No entanto, sendo o valor encontrado muito próximo à faixa ideal (PCI > 2.000 Kcal/kg), a queima bruta é do RSU de Maceió pode ainda ser tecnicamente viável, a depender do sistema a ser adotado e do tratamento dado o resíduo.

5.5.2. Quantificação do potencial energético da incineração

Estimou-se o potencial energético da incineração, culminando nos resultados da Tabela 17.

Tabela 17 – Estimativa do Potencial energético da incineração

Ano	Potência Disponível (KW)	Energia Disponível (kwh/ano)	Habitantes atendidos (Hab)
2010	1.875,546	16.429.781,705	13.971
2011	1.898,066	16.627.057,431	14.139
2012	1.919,737	16.816.899,866	14.300
2013	1.940,569	16.999.380,377	14.455
2014	1.960,570	17.174.591,823	14.604
2015	1.979,754	17.342.646,364	14.747
2016	1.998,136	17.503.673,298	14.884
2017	2.015,733	17.657.816,957	15.015
2018	2.032,561	17.805.234,670	15.141
2019	2.048,641	17.946.094,809	15.260
2020	2.063,993	18.080.574,948	15.375
2021	2.078,637	18.208.860,116	15.484
2022	2.092,596	18.331.141,182	15.588
2023	2.105,892	18.447.613,345	15.687
2024	2.118,547	18.558.474,760	15.781
2025	2.130,585	18.663.925,278	15.871
2026	2.142,028	18.764.165,308	15.956
2027	2.152,899	18.859.394,796	16.037
2028	2.163,221	18.949.812,321	16.114
2029	2.173,015	19.035.614,290	16.187
2030	2.182,305	19.116.994,247	16.256
2031	-	-	-
Média	1.957,865	17.150.897,631	15.279

Fonte: Autor, 2022.

Como pode-se observar na Tabela 17, para a inclinação, o ano de maior produção de potência e energia disponível é 2030, que coincide com o ano previsto para o fechamento do aterro sanitário e que receberá maior volume de RSU.

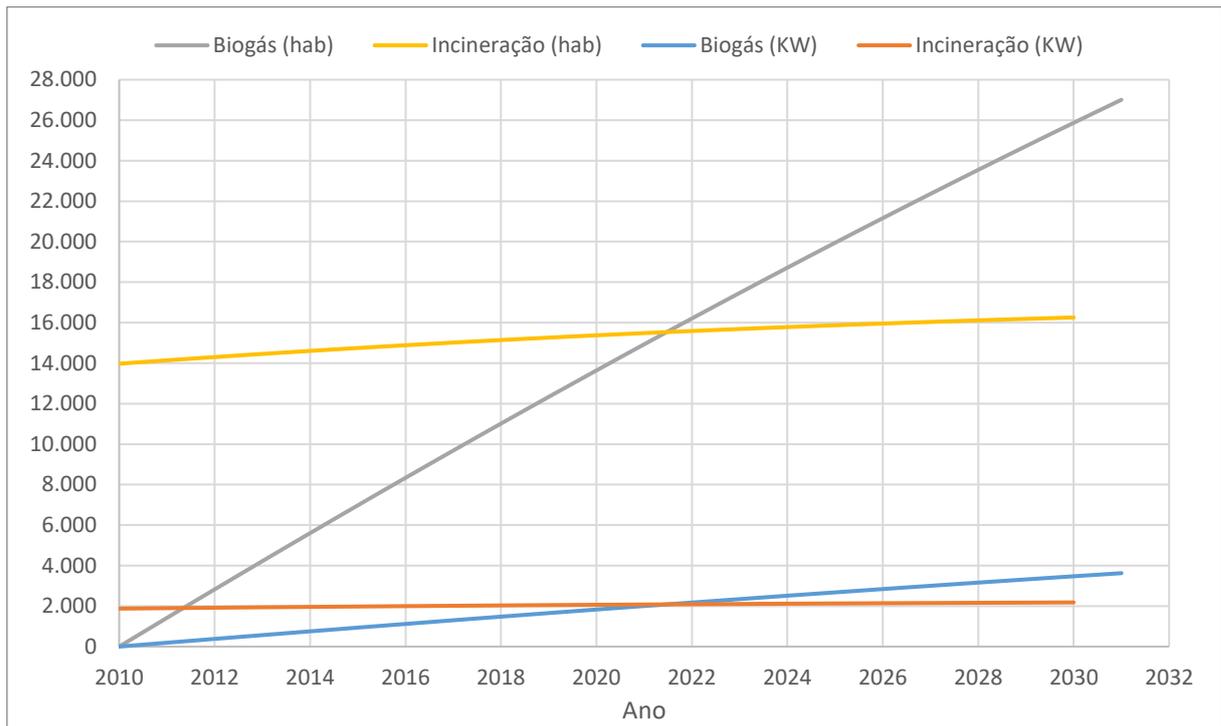
Considerando o ano de maior produção (2030), estima-se que, se houvesse o aproveitamento energético pela incineração dos resíduos neste ano, a energia elétrica gerada seria suficiente para abastecer uma população de, aproximadamente, 16.256 habitantes com uma potência teórica de aproximadamente 2,2 MW.

Por outro lado, considerando os valores teóricos médios dos primeiros 20 anos de produção energética, seria possível suprir as necessidades de energia elétrica de uma população de 15.279 habitantes, com uma potência média anual de 1,96 MW.

5.6. Análise comparativa e avaliação técnica-econômica

O gráfico da Figura 12 apresenta um comparativo entre a potência disponível e a quantidade de habitantes que seriam atendidos caso houvesse a recuperação energética do RSU encaminhados ao aterro de Maceió, e por meio do aproveitamento do biogás e por meio da incineração.

Figura 12 – Estimativa de habitantes a serem atendidos pela recuperação energética



Fonte: Autor, 2022.

Nota-se que as curvas de habitantes e de potência disponível seguem o mesmo comportamento, pois são indicadores diretamente proporcionais. Além disso, em cada caso, observa-se que as curvas referentes ao aproveitamento energético do biogás possuem uma tendência de maior crescimento que as curvas referentes à incineração.

Esse comportamento era esperado, uma vez que a energia proveniente da incineração é dada em função da quantidade de resíduos encaminhadas ao aterro, enquanto a recuperação energética do biogás é dependente da quantidade de gás produzido. É sabido que os RSU continuam produzindo biogás por um longo período após a sua disposição em aterro, gerando um efeito cumulativo, considerado pela ferramenta LandGEM.

Observa-se ainda que as linhas se cruzam entre 2021 e 2022, o que representa que neste ponto, as duas rotas tecnológicas se igualam em termos de potencial de produção energética.

A Tabela 18 concentra os valores máximos e médios obtidos pela estimativa do potencial energético das duas rotas tecnológicas estudadas, para 20 anos de produção.

Tabela 18 – Poder Calorífico Inferior do RSU de Maceió

Rota tecnológica		Potência disponível (MW)	Energia Disponível (kwh/ano)	Habitantes atendidos (Hab)
Biogás	Valor máximo	3,6	31.761.447	27.008
	Valor médio	1,9	16.462.375	14.665
Incineração	Valor máximo	2,2	19.116.994	16.256
	Valor médio	1,96	17.150.898	15.279

Fonte: Autor, 2022.

Na Tabela 18, é possível notar que os valores máximos são maiores para a recuperação energética do biogás, enquanto os valores médios são mais elevados para o cenário da incineração, em conformidade com o comportamento observado na Figura 12. Em termos energéticos e considerando esse horizonte, a incineração pode se apresentar mais atraente uma vez que possui melhor constância na recuperação energética, restando então a necessidade da análise de qual dessas rotas apresenta melhor viabilidade econômica.

Por outro lado, ao analisar a Tabela 14 e a Figura 11, nota-se que mesmo após o fechamento do aterro sanitário, ele permanecerá produzindo grandes quantidades de metano, passíveis de aproveitamento energético. Logo, se o horizonte considerado no presente estudo fosse maior, muito provavelmente o da recuperação do biogás superaria até mesmo os valores médios obtidos pela incineração. Vale ressaltar que o período considerado foi dado em função da vida útil estimada para o aterro sanitário, sendo o fechamento do aterro um fator limitante para a incineração.

5.7. Avaliação econômica

Neste item estão dispostos os resultados e discussões inerentes a avaliação técnica-econômica realizada pelo presente trabalho, que forneceu indicadores que

indicou, em teoria, a rota tecnológica mais viável dentre as duas analisadas, já que os indicadores utilizados permitiram identificar o cenário que possuiu maior adequação e viabilidade econômica para o município de Maceió.

5.7.1. Custos

Estimou-se os custos para cada cenário estudado em termos de Capex e Opex, conforme a metodologia descrita no item 4.7.1.

5.7.1.1. Custos de investimentos

Os valores de Capex levantados estão dispostos na Tabela 19, para esta prospecção utilizou-se do valor do dólar americano equivalente a R\$ 4,82 e a potência média estimada de 1,88 MW para o biogás, conforme o item 5.4.2.

Tabela 19 – Valores Capex levantados

Rota tecnológica / Fonte	Unidade	Valor
Biogás (SILVA <i>et al.</i>, 2017)	R\$	36.233.504,75
Biogás (EPE, 2021)	\$	7.517.324,64
	R\$	36.833.625,00
Incinerção (CNI, 2019)	\$	114.000.000,00
	R\$	549.480.000,00

Fonte: Autor, 2022.

Nota-se que o valor de Capex obtido para o cenário da recuperação energética do biogás para as duas metodologias utilizadas foram semelhantes, já que ambas as fontes são aplicáveis ao estudo. No entanto, para o prosseguimento dos cálculos utilizou-se o valor Capex que seguiu a taxa de referência proposta pela EPE (2021), por ser uma fonte mais recente e por representar o valor indicado pela fonte usada para a estimativa dos custos de operação e manutenção para este cenário.

Além disso, ressalta-se a sobreposição dos custos para a implantação de uma planta de incinerção em relação ao aproveitamento do biogás de aterro, chegando a ser quase 15 vezes mais cara. Esse valor superior já era esperado, uma vez que os gastos com a incinerção de RSU são altos principalmente em razão dos equipamentos necessários para o tratamento dos efluentes gasosos, essenciais para cumprir os limites de emissão estabelecidos pelas legislações (LEME,2011).

5.7.1.2. Custos de operação e manutenção

As taxas utilizadas para obtenção dos valores das despesas de operação e manutenção ao longo do tempo estão resumidas na Tabela 20. Para o biogás o valor foi dado em função da potência anual em KW, já para a incineração, considerou-se o preço por tonelada de resíduos a serem processados, conforme descrito no item 4.7.1.2.

Tabela 20 – Taxas para cálculo do valor Opex

Rota tecnológica / Fonte	Unidade	Valor
Biogás (EPE, 2021)	R\$/KW	600,00
Incineração (CNI, 2019)	\$/t	17,60
	R\$/t	84,83

Fonte: Autor, 2022.

Assim, com os dados de quantidade de resíduos encaminhados ao aterro anualmente, estimou-se os valores Opex para a recuperação energética do biogás do aterro sanitário de Maceió, num horizonte de 20 primeiros anos de produção de gás significativa (2011 – 2031). Os valores de Opex para este cenário estão dispostos na Tabela 21.

Tabela 21 – Valores Opex levantados para o aproveitamento do biogás

Ano	Potência disponível (KW)	Opex (R\$)
2010	-	-
2011	190,398	R\$ 114.238,83
2012	379,312	R\$ 227.587,27
2013	566,685	R\$ 340.011,26
2014	752,463	R\$ 451.477,93
2015	936,593	R\$ 561.955,67
2016	1.119,024	R\$ 671.414,33
2017	1.299,709	R\$ 779.825,20
2018	1.478,602	R\$ 887.161,17
2019	1.655,661	R\$ 993.396,78
2020	1.830,847	R\$ 1.098.508,19
2021	2.004,122	R\$ 1.202.473,32
2022	2.175,453	R\$ 1.305.271,80
2023	2.344,808	R\$ 1.406.884,96
2024	2.512,160	R\$ 1.507.295,90

Ano	Potência disponível (KW)	Opex (R\$)
2025	2.677,482	R\$ 1.606.489,41
2026	2.840,753	R\$ 1.704.451,96
2027	3.001,953	R\$ 1.801.171,72
2028	3.161,064	R\$ 1.896.638,43
2029	3.318,072	R\$ 1.990.843,47
2030	3.472,966	R\$ 2.083.779,72
2031	3.625,736	R\$ 2.175.441,55
Média	1.879,267	R\$ 1.127.559,95

Fonte: Autor, 2022.

Ao observar o comportamento dos valores expressos na Tabela 21 ao longo do tempo, nota-se que as despesas de operação e manutenção crescem proporcionalmente à medida que a potência média aumenta. Além disso, os custos anuais de Opex médio gira em torno de R\$ 1.127.559,95.

Já na Tabela 22 estão expressos os valores de Opex anuais para o cenário da incineração dos RSU, para isso utilizou-se como parâmetro a produção de RSU teórica encaminhada ao aterro.

Tabela 22 – Valores Opex levantados para a incineração

Ano	RSU enviadas ao Aterro (t/ano)	Opex (R\$)
2010	349.011,466	R\$ 29.607.340,69
2011	353.202,118	R\$ 29.962.842,04
2012	357.234,867	R\$ 30.304.948,21
2013	361.111,229	R\$ 30.633.787,80
2014	364.833,178	R\$ 30.949.528,15
2015	368.403,095	R\$ 31.252.371,37
2016	371.823,728	R\$ 31.542.550,47
2017	375.098,142	R\$ 31.820.325,54
2018	378.229,679	R\$ 32.085.980,11
2019	381.221,916	R\$ 32.339.817,57
2020	384.078,625	R\$ 32.582.157,93
2021	386.803,737	R\$ 32.813.334,63
2022	389.401,306	R\$ 33.033.691,62
2023	391.875,479	R\$ 33.243.580,65
2024	394.230,465	R\$ 33.443.358,82
2025	396.470,510	R\$ 33.633.386,26
2026	398.599,870	R\$ 33.814.024,13
2027	400.622,793	R\$ 33.985.632,73

Ano	RSU enviadas ao Aterro (t/ano)	Opex (R\$)
2028	402.543,497	R\$ 34.148.569,92
2029	404.366,155	R\$ 34.303.189,64
2030	406.094,877	R\$ 34.449.840,65
Média	381.678,892	R\$ 32.378.583,76

Fonte: Autor, 2022.

Nota-se que as despesas de operação e manutenção crescem proporcionalmente à medida que são enviados mais RSU ao aterro sanitário, com custos médios anuais de Opex em torno de R\$ 32.378.583,76.

De maneira semelhante ao Capex, o valor médio de Opex para a incineração mostrou-se muito superior aos valores teóricos obtidos para os processos de manutenção e operação da recuperação do biogás. Isso se justifica, pois as usinas de incineração, possuem altos custos tanto de investimento, como de operação, apresentam dificuldades para os países em desenvolvimento, como o Brasil, quando o capital e a mão-de-obra especializada são escassas (POLETTO FILHO, 2008).

5.7.2. Receitas

Neste item serão apresentadas as receitas levantadas no presente trabalho, para os dois cenários em estudo.

5.7.2.1. Venda da energia

As taxas de comercialização descritas no item 4.7.2.1, estão resumidas na Tabela 23. Nela é possível observar que a tarifa de venda de energia para a incineração é mais que o dobro da tarifa adotada para o biogás. Isso é um exemplo nítido da volatilidade dos preços de venda provenientes dos leilões de energia nova brasileiros, e pode estar associado à produção de energia com custos mais elevado no caso da incineração.

Tabela 23 – Tarifas de comercialização de energia adotadas

Rota tecnológica	Tarifa média de venda de energia elétrica (R\$/MWh)	Fonte
Biogás	251,00	EPE (2016)
Incineração	549,40	EPE (2021)

Fonte: Autor, 2022.

Partindo destas tarifas, junto à energia disponível estimada, estipulou-se os valores das receitas anuais provenientes da comercialização da energia recuperada pelas duas rotas tecnológicas estudadas, conforme Tabela 24.

Tabela 24 – Receitas anuais pela venda de energia

Ano	Biogás		Incineração	
	Energia Disponível (MWh/ano)	Venda da energia (R\$)	Energia Disponível (MWh/ano)	Venda da energia (R\$)
2010	-	-	16.429,78	R\$ 9.026.522,07
2011	1.667,89	R\$ 418.639,62	16.627,06	R\$ 9.134.905,35
2012	3.322,77	R\$ 834.016,30	16.816,90	R\$ 9.239.204,79
2013	4.964,16	R\$ 1.246.005,27	16.999,38	R\$ 9.339.459,58
2014	6.591,58	R\$ 1.654.486,01	17.174,59	R\$ 9.435.720,75
2015	8.204,55	R\$ 2.059.342,77	17.342,65	R\$ 9.528.049,91
2016	9.802,65	R\$ 2.460.464,94	17.503,67	R\$ 9.616.518,11
2017	11.385,45	R\$ 2.857.747,42	17.657,82	R\$ 9.701.204,64
2018	12.952,55	R\$ 3.251.090,84	17.805,23	R\$ 9.782.195,93
2019	14.503,59	R\$ 3.640.401,82	17.946,09	R\$ 9.859.584,49
2020	16.038,22	R\$ 4.025.593,12	18.080,57	R\$ 9.933.467,88
2021	17.556,11	R\$ 4.406.583,75	18.208,86	R\$ 10.003.947,75
2022	19.056,97	R\$ 4.783.299,03	18.331,14	R\$ 10.071.128,97
2023	20.540,52	R\$ 5.155.670,63	18.447,61	R\$ 10.135.118,77
2024	22.006,52	R\$ 5.523.636,56	18.558,47	R\$ 10.196.026,03
2025	23.454,75	R\$ 5.887.141,08	18.663,93	R\$ 10.253.960,55
2026	24.885,00	R\$ 6.246.134,66	18.764,17	R\$ 10.309.032,42
2027	26.297,11	R\$ 6.600.573,87	18.859,39	R\$ 10.361.351,50
2028	27.690,92	R\$ 6.950.421,21	18.949,81	R\$ 10.411.026,89
2029	29.066,31	R\$ 7.295.644,99	19.035,61	R\$ 10.458.166,49
2030	30.423,18	R\$ 7.636.219,16	19.116,99	R\$ 10.502.876,64
2031	31.761,45	R\$ 7.972.123,12	-	-
Média	16.462,375	R\$ 4.132.056,19	17.150,90	R\$ 9.871.403,31

Fonte: Autor, 2022.

Ao analisar a Tabela 24, é possível verificar que em média, a energia disponível para os cenários é semelhante, sendo a da incineração apenas 4% superior à do biogás.

Entretanto, como um reflexo do valor de venda de energia por KWh, o valor teórico de arrecadação médio da venda da energia pela incineração supera o dobro do valor obtido pelo biogás.

5.7.2.2. Créditos de carbono

A Tabela 25 resume os parâmetros adotados para o cálculo do valor dos créditos de carbono anuais, em conformidade com o item 4.7.2.2.

Tabela 25 – Parâmetros básicos usados no cálculo dos créditos de carbono

Parâmetro	Unidade	Valor	Fonte
Valor do Cbio:B3 (30/06/2022)	R\$/tCO ₂ eq	202,65	DATAGRO (2022)
Peso específico do CH ₄	t/m ³	0,000671	Linde (2020)
Potencial multiplicador efeito estufa do CH ₄	Constante	25	Fernandes <i>et al.</i> (2018)

Fonte: Autor, 2022.

Desse modo, por meio do conhecimento do volume de metano produzido, chegou-se ao valor teórico das receitas anuais provenientes da comercialização dos créditos de carbono no cenário da recuperação energética do biogás, como previsto na Tabela 26.

Tabela 26 – Créditos de carbono na recuperação energética do biogás

Ano	Volume de CH ₄ emitido (m ³ CH ₄)	Toneladas de CH ₄ emitidas (tCH ₄)	CO ₂ equivalente (tCO ₂ eq)	Créditos de carbono (R\$)
2010	0,00	0,00	0,00	R\$ 0,00
2011	563.316,72	377,99	9.449,64	R\$ 1.914.969,13
2012	1.122.242,88	753,02	18.825,62	R\$ 3.815.012,76
2013	1.676.610,56	1.125,01	28.125,14	R\$ 5.699.560,04
2014	2.226.257,60	1.493,82	37.345,47	R\$ 7.568.059,75
2015	2.771.028,26	1.859,36	46.484,00	R\$ 9.419.982,42
2016	3.310.773,71	2.221,53	55.538,23	R\$ 11.254.822,12
2017	3.845.352,51	2.580,23	64.505,79	R\$ 13.072.098,01
2018	4.374.630,95	2.935,38	73.384,43	R\$ 14.871.355,60
2019	4.898.483,39	3.286,88	82.172,06	R\$ 16.652.167,74
2020	5.416.792,44	3.634,67	90.866,69	R\$ 18.414.135,36
2021	5.929.449,10	3.978,66	99.466,51	R\$ 20.156.887,98
2022	6.436.352,91	4.318,79	107.969,82	R\$ 21.880.084,03
2023	6.937.411,92	4.655,00	116.375,08	R\$ 23.583.410,95
2024	7.432.542,69	4.987,24	124.680,90	R\$ 25.266.585,13
2025	7.921.670,25	5.315,44	132.886,02	R\$ 26.929.351,64
2026	8.404.727,95	5.639,57	140.989,31	R\$ 28.571.483,94
2027	8.881.657,32	5.959,59	148.989,80	R\$ 30.192.783,28
2028	9.352.407,93	6.275,47	156.886,64	R\$ 31.793.078,20
2029	9.816.937,13	6.587,16	164.679,12	R\$ 33.372.223,75

Ano	Volume de CH ₄ emitido (m ³ CH ₄)	Toneladas de CH ₄ emitidas (tCH ₄)	CO ₂ equivalente (tCO ₂ eq)	Créditos de carbono (R\$)
2030	10.275.209,88	6.894,67	172.366,65	R\$ 34.930.100,75
2031	10.727.198,43	7.197,95	179.948,75	R\$ 36.466.614,94
Média	5.560.047,93	3.730,79	93.269,80	R\$ 18.901.125,80

Fonte: Autor, 2022.

Desse modo, têm-se que os valores teóricos a serem arrecadados pela comercialização dos créditos de descarbonização é proporcional ao volume de CH₄ emitido pelo aterro, com uma média anual de R\$ 18.901.125,80. Estes valores anuais foram somados aos quantitativos da venda de energia para compor as receitas para o aproveitamento energético do biogás.

5.7.3. Indicadores econômicos

Neste item serão apresentados os resultados inerentes aos indicadores econômicos, seguindo a metodologia descrita no item 4.7.3.

5.7.3.1. Fluxo de caixa

O fluxo de caixa representa a soma das entradas e saídas ao longo do tempo, considerando os valores Capex e Opex. A Tabela 27 apresenta o somatório dos custos e receitas para o cenário do aproveitamento energético do biogás produzido no aterro de Maceió. Já a Tabela 28 traz esse quantitativo para no cenário da incineração dos RSU.

Tabela 27 – Fluxo de caixa do aproveitamento energético do Biogás

Ano	Custos (R\$)	Receitas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
Investimento inicial	R\$ 36.833.625,00	-	-R\$ 36.833.625,00
2010	-	-	-
2011	R\$ 114.238,83	R\$ 2.333.608,75	R\$ 2.219.369,92
2012	R\$ 227.587,27	R\$ 4.649.029,06	R\$ 4.421.441,79
2013	R\$ 340.011,26	R\$ 6.945.565,31	R\$ 6.605.554,05
2014	R\$ 451.477,93	R\$ 9.222.545,76	R\$ 8.771.067,83
2015	R\$ 561.955,67	R\$ 11.479.325,19	R\$ 10.917.369,51
2016	R\$ 671.414,33	R\$ 13.715.287,06	R\$ 13.043.872,73
2017	R\$ 779.825,20	R\$ 15.929.845,43	R\$ 15.150.020,23
2018	R\$ 887.161,17	R\$ 18.122.446,44	R\$ 17.235.285,27
2019	R\$ 993.396,78	R\$ 20.292.569,56	R\$ 19.299.172,79
2020	R\$ 1.098.508,19	R\$ 22.439.728,48	R\$ 21.341.220,29

Ano	Custos (R\$)	Receitas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
2021	R\$ 1.202.473,32	R\$ 24.563.471,73	R\$ 23.360.998,40
2022	R\$ 1.305.271,80	R\$ 26.663.383,06	R\$ 25.358.111,26
2023	R\$ 1.406.884,96	R\$ 28.739.081,59	R\$ 27.332.196,62
2024	R\$ 1.507.295,90	R\$ 30.790.221,69	R\$ 29.282.925,79
2025	R\$ 1.606.489,41	R\$ 32.816.492,72	R\$ 31.210.003,32
2026	R\$ 1.704.451,96	R\$ 34.817.618,60	R\$ 33.113.166,64
2027	R\$ 1.801.171,72	R\$ 36.793.357,15	R\$ 34.992.185,44
2028	R\$ 1.896.638,43	R\$ 38.743.499,41	R\$ 36.846.860,97
2029	R\$ 1.990.843,47	R\$ 40.667.868,74	R\$ 38.677.025,27
2030	R\$ 2.083.779,72	R\$ 42.566.319,91	R\$ 40.482.540,19
2031	R\$ 2.175.441,55	R\$ 44.438.738,06	R\$ 42.263.296,50

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 28 – Fluxo de caixa do aproveitamento energético pela incineração

Ano	Custos (R\$)	Receitas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
Investimento inicial	R\$ 549.480.000,00	-	-R\$ 549.480.000,00
2010	R\$ 29.607.340,69	R\$ 9.026.522,07	-R\$ 20.580.818,62
2011	R\$ 29.962.842,04	R\$ 9.134.905,35	-R\$ 20.827.936,69
2012	R\$ 30.304.948,21	R\$ 9.239.204,79	-R\$ 21.065.743,42
2013	R\$ 30.633.787,80	R\$ 9.339.459,58	-R\$ 21.294.328,22
2014	R\$ 30.949.528,15	R\$ 9.435.720,75	-R\$ 21.513.807,40
2015	R\$ 31.252.371,37	R\$ 9.528.049,91	-R\$ 21.724.321,46
2016	R\$ 31.542.550,47	R\$ 9.616.518,11	-R\$ 21.926.032,36
2017	R\$ 31.820.325,54	R\$ 9.701.204,64	-R\$ 22.119.120,91
2018	R\$ 32.085.980,11	R\$ 9.782.195,93	-R\$ 22.303.784,18
2019	R\$ 32.339.817,57	R\$ 9.859.584,49	-R\$ 22.480.233,08
2020	R\$ 32.582.157,93	R\$ 9.933.467,88	-R\$ 22.648.690,06
2021	R\$ 32.813.334,63	R\$ 10.003.947,75	-R\$ 22.809.386,88
2022	R\$ 33.033.691,62	R\$ 10.071.128,97	-R\$ 22.962.562,65
2023	R\$ 33.243.580,65	R\$ 10.135.118,77	-R\$ 23.108.461,88
2024	R\$ 33.443.358,82	R\$ 10.196.026,03	-R\$ 23.247.332,79
2025	R\$ 33.633.386,26	R\$ 10.253.960,55	-R\$ 23.379.425,72
2026	R\$ 33.814.024,13	R\$ 10.309.032,42	-R\$ 23.504.991,71
2027	R\$ 33.985.632,73	R\$ 10.361.351,50	-R\$ 23.624.281,23
2028	R\$ 34.148.569,92	R\$ 10.411.026,89	-R\$ 23.737.543,03
2029	R\$ 34.303.189,64	R\$ 10.458.166,49	-R\$ 23.845.023,15
2030	R\$ 34.449.840,65	R\$ 10.502.876,64	-R\$ 23.946.964,01
2031	-	-	-

Fonte: Autor, 2022.

Observa-se que para o biogás, o fluxo de caixa é positivo em todo o período, o que significa que as receitas anuais superam os custos, neste caso o fluxo de caixa pode ser suficiente para custear o investimento inicial. Já para a incineração, nota-se que o fluxo de caixa é negativo a todo tempo, uma vez que os custos de operação e manutenção anuais são superiores às receitas, indicando que o cenário é inviável. A viabilidade econômica teórica dessas rotas será mais bem evidenciada pelos indicadores econômicos previstos nos próximos itens.

5.7.3.2. Valor Presente Líquido (VPL)

Os resultados dos Valores Presentes (VP) para cada fluxo de caixa anual e o VPL resultante para as duas rotas tecnológicas estudadas no presente trabalho estão dispostos na Tabela 29.

Tabela 29 – Resultados do VPL para os cenários avaliados

Ano	VP Biogás	VP Incineração
Investimento inicial	-R\$ 36.833.625,00	-R\$ 549.480.000,00
2010	-	-R\$ 18.375.730,91
2011	R\$ 1.769.268,11	-R\$ 16.603.903,61
2012	R\$ 3.147.094,94	-R\$ 14.994.180,07
2013	R\$ 4.197.949,01	-R\$ 13.532.930,55
2014	R\$ 4.976.939,44	-R\$ 12.207.512,09
2015	R\$ 5.531.079,16	-R\$ 11.006.217,34
2016	R\$ 5.900.385,60	-R\$ 9.918.223,53
2017	R\$ 6.118.839,07	-R\$ 8.933.541,95
2018	R\$ 6.215.216,65	-R\$ 8.042.968,17
2019	R\$ 6.213.817,13	-R\$ 7.238.033,40
2020	R\$ 6.135.090,87	-R\$ 6.510.957,18
2021	R\$ 5.996.186,44	-R\$ 5.854.601,50
2022	R\$ 5.811.424,61	-R\$ 5.262.426,70
2023	R\$ 5.592.708,95	-R\$ 4.728.449,14
2024	R\$ 5.349.881,06	-R\$ 4.247.200,78
2025	R\$ 5.091.027,61	-R\$ 3.813.690,78
2026	R\$ 4.822.745,33	-R\$ 3.423.369,03
2027	R\$ 4.550.369,45	-R\$ 3.072.091,85
2028	R\$ 4.278.170,27	-R\$ 2.756.089,61
2029	R\$ 4.009.522,09	-R\$ 2.471.936,41
2030	R\$ 3.747.048,20	-R\$ 2.216.521,69
2031	R\$ 3.492.744,92	-
VPL	R\$ 66.113.883,90	-R\$ 714.690.576,30

Fonte: Autor, 2022.

O valor do VPL resultante para o aproveitamento energético do biogás é positivo ($VPL > 0$), superando os investimentos iniciais e custos operacionais e de manutenção em R\$ 66.113.883,90 ao fim do horizonte estudado, à uma TMA de 12%. Este cenário indica atratividade e viabilidade econômica na aplicação da rota.

No entanto, para o caso da incineração dos RSU, as receitas geradas pela venda da energia, mesmo sendo superiores às adotadas para o biogás, não foram suficientes para cobrir os custos durante o período de 20 anos de funcionamento analisados, uma vez que o VPL é negativo ($VPL < 0$), o projeto não apresenta atratividade.

Desse modo, com a inviabilidade econômica indicada pelo VPL negativo da incineração, não foi possível calcular os demais indicadores previstos nesse estudo para este cenário, uma vez que os seus valores existem apenas para projetos potencialmente atrativos.

Sendo assim os próximos indicadores foram levantados apenas para o cenário de recuperação energética do biogás.

5.7.3.3. Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR resultante da aplicação dos dados para a rota tecnológica do biogás foi equivalente a 23,41 %, esse valor supera a TMA em 11,41%. Logo, como o valor de TIR encontrado foi positivo e superior à TMA de 12%, o cenário é atrativo economicamente, complementando a indicação do VPL.

5.7.3.4. Tempo de Retorno de Capital (TRC)

A Tabela 30 exibe os fluxos financeiros resultantes para obtenção dos valores dos tempos de retorno de capital (Payback simples e Payback descontado) para a recuperação energética do biogás.

Tabela 30 – Potencial energético da incineração

Ano	Payback Simples		Payback Descontado	
	Fluxo de caixa	Biogás Fluxo Acumulado	Biogás Fluxo de caixa desc.	Biogás Fluxo desc. Acumulado
2010	-R\$ 36.833.625,00	-R\$ 36.833.625,00	-R\$ 36.833.625,00	-R\$ 36.833.625,00
2011	R\$ 2.219.369,92	-R\$ 34.614.255,08	R\$ 1.769.268,11	-R\$ 35.064.356,89
2012	R\$ 4.421.441,79	-R\$ 30.192.813,29	R\$ 3.147.094,94	-R\$ 31.917.261,95
2013	R\$ 6.605.554,05	-R\$ 23.587.259,24	R\$ 4.197.949,01	-R\$ 27.719.312,94
2014	R\$ 8.771.067,83	-R\$ 14.816.191,41	R\$ 4.976.939,44	-R\$ 22.742.373,50

Ano	Payback Simples		Payback Descontado	
	Fluxo de caixa	Biogás Fluxo Acumulado	Biogás Fluxo de caixa desc.	Biogás Fluxo desc. Acumulado
2015	R\$ 10.917.369,51	-R\$ 3.898.821,90	R\$ 5.531.079,16	-R\$ 17.211.294,34
2016	R\$ 13.043.872,73	R\$ 9.145.050,84	R\$ 5.900.385,60	-R\$ 11.310.908,75
2017	R\$ 15.150.020,23	R\$ 24.295.071,07	R\$ 6.118.839,07	-R\$ 5.192.069,67
2018	R\$ 17.235.285,27	R\$ 41.530.356,33	R\$ 6.215.216,65	R\$ 1.023.146,98
2019	R\$ 19.299.172,79	R\$ 60.829.529,12	R\$ 6.213.817,13	R\$ 7.236.964,11
2020	R\$ 21.341.220,29	R\$ 82.170.749,41	R\$ 6.135.090,87	R\$ 13.372.054,97
2021	R\$ 23.360.998,40	R\$ 105.531.747,81	R\$ 5.996.186,44	R\$ 19.368.241,41
2022	R\$ 25.358.111,26	R\$ 130.889.859,07	R\$ 5.811.424,61	R\$ 25.179.666,02
2023	R\$ 27.332.196,62	R\$ 158.222.055,70	R\$ 5.592.708,95	R\$ 30.772.374,97
2024	R\$ 29.282.925,79	R\$ 187.504.981,48	R\$ 5.349.881,06	R\$ 36.122.256,03
2025	R\$ 31.210.003,32	R\$ 218.714.984,80	R\$ 5.091.027,61	R\$ 41.213.283,64
2026	R\$ 33.113.166,64	R\$ 251.828.151,44	R\$ 4.822.745,33	R\$ 46.036.028,97
2027	R\$ 34.992.185,44	R\$ 286.820.336,88	R\$ 4.550.369,45	R\$ 50.586.398,42
2028	R\$ 36.846.860,97	R\$ 323.667.197,85	R\$ 4.278.170,27	R\$ 54.864.568,69
2029	R\$ 38.677.025,27	R\$ 362.344.223,12	R\$ 4.009.522,09	R\$ 58.874.090,78
2030	R\$ 40.482.540,19	R\$ 402.826.763,31	R\$ 3.747.048,20	R\$ 62.621.138,98
2031	R\$ 42.263.296,50	R\$ 445.090.059,81	R\$ 3.492.744,92	R\$ 66.113.883,90

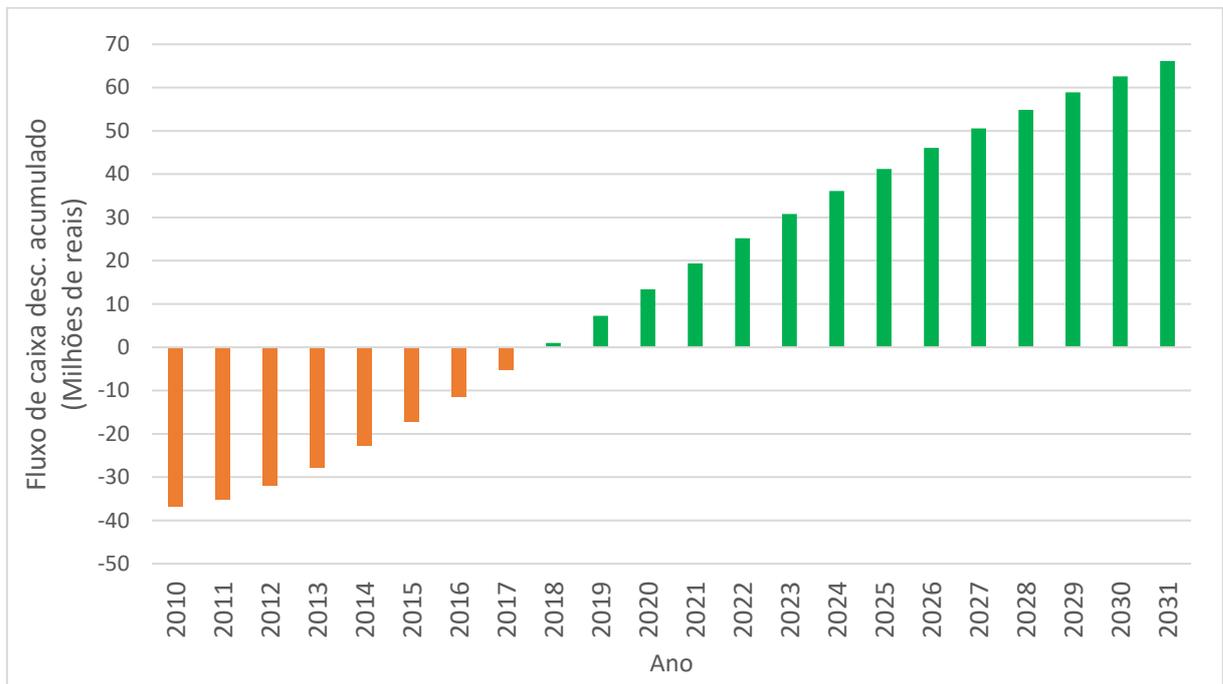
Fonte: Autor, 2022.

Em conformidade com os valores expressos na Tabela 30, nota-se que, para o Payback simples, o fluxo de caixa acumulado passa a ser positivo entre os anos de 2015 e 2016, enquanto para o Payback descontado o projeto se paga entre os anos de 2017 e 2018.

Precisamente, o Payback simples acontece após 5 anos, 3 meses e 20 dias (abril de 2015), enquanto o Payback descontado ocorre em 7 anos, 9 meses e 22 dias (outubro de 2017).

Desse modo, optou-se por considerar o período retornado pelo Payback descontado, por ser mais aplicável ao considerar a TMA. O gráfico da Figura 13 ilustra o comportamento do Payback descontado ao decorrer dos anos, em que se nota a atratividade do projeto a partir do ano de 2018.

Figura 13 – Fluxo de caixa descontado acumulado para o biogás



Fonte: Autor, 2022.

Assim, as análises dos indicadores econômicos avaliados corroboram para uma maior adequabilidade do cenário do aproveitamento energético do biogás, uma vez que o fluxo de caixa negativo para incineração implicou em limitações de cálculo, indicando sua inviabilidade econômica.

6. CONCLUSÕES

A revisão de literatura e bibliometria efetuada retornou a relevância da linha de pesquisa deste estudo, que, para além disso, permitiu ampliar os horizontes do propósito inicial do trabalho e forneceu base teórica suficiente para a realização dele. Ademais, o conhecimento dos aspectos inerentes à gestão e composição do RSU da área de estudo propiciaram a aplicação de dados mais realísticos e atuais, permitindo a realização da quantificação dos potenciais energéticos dos dois cenários de estudo.

O cálculo do potencial energético indicou que seria possível suprir as necessidades de energia elétrica de uma população média de 14.665 habitantes para o caso do biogás, com uma potência média anual de 1,88 MW e uma população de 15.279 habitantes, com uma potência média anual de 1,96 MW no cenário da incineração. Além disso, entre os anos de 2021 e 2022, as duas rotas tecnológicas se igualam em termos de potencial de produção energética.

Já na etapa de avaliação técnico-econômica realizada, notou-se que os custos Capex e Opex da incineração superaram de maneira significativa os mesmos custos considerados para a recuperação energética do biogás; apesar dos valores da venda de energia para a incineração representarem mais que o dobro dos valores da venda de energia do outro cenário, a incineração não apresentou viabilidade econômica de acordo com os indicadores utilizados no presente estudo.

Além disso, ressalta-se a importância da comercialização dos créditos de carbono, que foi indispensável para que a recuperação energética do biogás se tornasse viável, uma vez que o estudo da viabilidade econômica indicou atratividade apenas para este cenário, em que se obteve um valor de VPL em torno de 66 milhões de reais, TIR de 23,4% e TRC descontado menor que 8 anos.

Nesse contexto, o presente estudo indicou que as vantagens do aproveitamento energético do biogás se sobressaem em relação à incineração. No entanto, em todos os casos, antes que se aplique um projeto dessa natureza, deve-se avaliar profundamente os investimentos e receitas específicos de cada rota tecnológica, bem como os seus impactos ambientais.

A análise simples da composição gravimétrica do RSU de Maceió, também se configurou como um possível indicativo de que o aproveitamento do biogás seria mais aplicável, uma vez que há predominância de resíduos orgânicos no material que chega ao aterro sanitário, que favorece uma maior produção do efluente gasoso. Em

contrapartida, os materiais que possuem maior PCI para a incineração como a borracha e plástico compõem uma pequena parcela dos RSU, o que reduziria as taxas de conversão energética para este cenário, caso fosse implantado.

Em estudos futuros, para obtenção de resultados mais precisos em um cenário da recuperação energética do biogás e cálculo dos créditos de carbono, recomenda-se que se verifique experimentalmente ou na literatura a fração de biogás produzida no aterro que realmente consegue ser captada pelos gasodutos, uma vez que o gás produzido dificilmente será captado em sua totalidade, sendo um fator que depende do grau de compactação e qualidade do fechamento do aterro, podendo ocasionar a redução da eficiência de todo o processo.

Para além disso, recomenda-se a análise da redução de custos que seria promovida pelo aumento da vida útil do aterro sanitário para o caso da incineração, uma vez que a prolongação ocasionada pela redução do volume dos RSU nesta tecnologia implicaria em economia de recursos financeiros.

REFERÊNCIAS

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**: Ed.2020. 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 15 fev. 2022.

ALVES, Rodrigo Baduco. **ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DE SUINOCULTURA EM TERMINAÇÃO**. 2019. 26 f. TCC (Graduação) - Curso de Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/20486/1/analisegeracaoenergiasuinoalternativa.pdf>. Acesso em 02 jul. 2022.

ANDRADE, Amanda Brito Bezerra. **ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO USO DO BIOGÁS GERADO EM ATERRO SANITÁRIO NO ESTADO DA PARAÍBA**. 2022. 24 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/46129/1/ANALISEDAVIABILIDADE_ANDRADE_2022.pdf. Acesso em 17 jun. 2022.

ANDRETTI, Fabricio Viana; FERREIRA, João Alberto; MANNARINO, Camille Ferreira. Análise da aplicabilidade da Portaria 557 do Ministério das Cidades em estudos de viabilidade técnico-econômica para incineração com recuperação energética de resíduo sólido urbano no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 26, n. 6, p. 1181-1190, dez. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220200402>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/f7qsp7X7vD6hsnTZZfzVXqM/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em 01 jul. 2022.

ARAÚJO, Carlos AA. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. **Em questão**, v. 12, n. 1, p. 11-32, 2006. Disponível em: <https://www.seer.ufrgs.br/EmQuestao/article/view/16/5>. Acesso em: 11 fev. 2022.

ARAÚJO, Liz Geise Santos de. **Avaliação do lixiviado de aterro sanitário: geração e tecnologias de tratamento.** 2019. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/37920>. Acesso em: 15 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos.** 2 ed, 2004. 21 p.

ASSUNÇÃO, Saimon Gleico dos Santos. **Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos - Um Estudo da Viabilidade Técnica da Geração de Biogás na Região Metropolitana De Belém.** XXXV Encontro Nacional E Engenharia De Produção.

BRASIL. Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022. **Aprova O Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília, DF, 13 abr. 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.043-de-13-de-abril-de-2022-393566799>. Acesso em 28 jun. 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2019.** Cap 07. Brasília, 2020.

BRASIL. Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019. **Disciplina A Recuperação Energética dos Resíduos Sólidos Urbanos Referida no § 1º do Art. 9º da Lei Nº 12.305, de 2010 e no Art. 37 do Decreto Nº 7.404, de 2010.** Brasília, DF, 02 maio 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-interministerial-n%C2%BA-274-de-30-de-abril-de-2019-86235505> . Acesso em 08 jun. 2022.

CCEE. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Leilões.** Disponível em: <https://www.ccee.org.br/mercado/leilao-mercado>. Acesso em: 19 jun. 2022.

CNI. Confederação Nacional da Indústria. **Recuperação energética de resíduos sólidos: um guia para tomadores de decisão.** – Brasília : CNI, 2019. 111 p. : il. ISBN 978-85-7957-219-7. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/f3/e7/f3e751fc-c9a0-44f0-

a769-

f3a665e3a0f4/recuperacao_energetica_de_residuos_solidos_um_gui_a_para_tomado_res_de_deciso.es.pdf. Acesso em 15 mai. 2022.

COSTA, T.; LOPES, S.; FERNÁNDEZ-LLIMÓS, F.; AMANTE, M.; FARIA, P. **A Bibliometria e a Avaliação da Produção Científica: indicadores e ferramentas.**

Actas dos Congressos Nacionais de Bibliotecários, Arquivistas e Documentalistas, n. 11, 2012. Disponível em:

http://webpages.icav.up.pt/Pessoas/mccunha/Metodologia_Investigacao%20A7%20A3o/Recursos/Indicadores_bibliometricos.pdf. Acesso em: 14 fev. 2022.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **Landfill gas emissions model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide.** maio 2005. Disponível em:

<https://www3.epa.gov/ttnecatc1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>. Acesso em 28 nov. 2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **23º Leilão de Energia Nova A-5.** 2016.

Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-120/Resultado_completo_site_23_len.pdf. Acesso em 29 jun. 2022.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica:**

Ano Base 2020. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario_2021.pdf#search=ANUARIO%20ESTADISTICO. Acesso em: 10 mai. 2022.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Avaliação preliminar do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos de Campo Grande, MS.** Série

Recursos Energéticos. Nota técnica DEN 06/08, nov.2008. Disponível em:

https://cetesb.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/mme_epe_aproveitamento_rsu_ms.pdf. Acesso em: 11 fev. 2022.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional (BEN)**

2022: Ano base 2021, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites->

pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em 20 jun/2022.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Leilão de Energia Nova A-5 de 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-592/Informe%20Vencedores%20LEN%20A5.pdf>. Acesso em 02 jul. 2022.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética: MME/EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-522/Caderno%20de%20Par%C3%A2metros%20de%20Custos%20-%20PDE%202030.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2022.

EXCHANGE-RATES. **Taxas de Câmbio/Taxas do Dólar Americano em Real Brasileiro 01/06/2022/**. 2022. Disponível em: <https://pt.exchange-rates.org/Rate/USD/BRL/01-06-2022>. Acesso em jun/2022.

FERNANDES, Giovanna Loiola; SANTOS, Ivan Felipe Silva dos. Avaliação do Potencial Energético de Aterros Sanitários de Seis Cidades Brasileiras. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [s.l.], v. 7, n. 1, p.51-65, 19 fev. 2018. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v7i1.57967>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/57967/34868>. Acesso em 20 fev. 2022.

FERREIRA, Wemerson Rocha. **Análise do Potencial Energético Territorial do Biogás Proveniente de Aterros Sanitários para Inserção na Matriz Elétrica do Estado de Minas Gerais no Horizonte de 2050**. 2018. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares, Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-AYJKUR/1/disserta__o_completa_vf_wrf.pdf. Acesso em: 20 fev. 2022.

FREITAS, Flávio Ferreira. **Métodos de intensificação da biodigestão anaeróbia visando a geração de eletricidade a partir do biogás**. 2019. 211 f. Dissertação

(Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

FREITAS, Lílian Carla Ferreira *et al.* Avaliação econômica e do potencial energético do biogás de aterro em Campinas - SP. **Research, Society And Development**, [s.l.], v. 8, n. 6, p.1-29, 31 mar. 2019. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v8i6.788>.

GUEDES, Vânia LS; BORSCHIVER, Suzana. Bibliometria: uma ferramenta estatística para a gestão da informação e do conhecimento, em sistemas de informação, de comunicação e de avaliação científica e tecnológica. **Encontro Nacional de Ciência da Informação**, v. 6, n. 1, p. 18, 2005. Disponível em: http://www.cinform-anteriores.ufba.br/vi_anais/docs/VaniaLSGuedes.pdf. Acesso em: 11 fev. 2022.

HUMBERTO, Júlia Santos. **Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos das Regiões Metropolitana, Litoral Norte e Zona da Mata do Estado de Alagoas**. 2017. 130 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Maceió**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/maceio/panorama>. Acesso em: 19 fev. 2022.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Solid Waste Disposal**. 2006. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_3_Ch3_SWDS.pdf>. Acessado em: 02 fev. 2022.

JUCÁ, J. F. T. **Diagnóstico de resíduos sólidos do estado de Alagoas**. Relatório final. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento/MMA. 2002.

LAYRARGUES, Philippe Pomier. **Políticas de gestão e Educação Ambiental para resíduos sólidos na economia de mercado: a obsolescência planejada e os limites da sustentabilidade no capitalismo**. XIII Concurso Internacional “Pensar Contracorriente”. Havana, 2016.

LEME, Marcio MV *et al.* **Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**: abordagem econômica e ambiental. In: **Congresso de Inovação Tecnológica**. 2011. Disponível em: <http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/Recuperac%CC%A7a%CC%83o-Energe%CC%81tica-de-Resi%CC%81duos-So%CC%81lidos-Urbanos-no-Brasil-abordagem-econo%CC%82mica-e-ambiental..pdf>. Acesso em 29 jun. 2022.

Lima, Fabiano Roberto Santos de. **Viabilidade econômica e financeira de projetos**. Volta Redonda, RJ: FERP, 2019. 144 p. ISBN: 978-85-66196-18-4. Disponível em: http://www2.ugb.edu.br/Arquivossite/Editora/pdfdoc/E-BOOK-VIABILIDADE_ECONOMICA.pdf. Acesso em 28 jun. 2022.

LINDE. **Folha de produto**: metano. Lisboa. 2020. 2 p. Disponível em: https://www.linde-gas.pt/pt/images/Metano_082020_tcm310-461304.pdf. Acesso em: 01 jul. 2022.

MACEDO, Marcelo; BOTELHO, Louise de Lira Roedel; DUARTE, Márcia Adriana Tomaz. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA SOBRE A PRODUÇÃO CIENTÍFICA EM APRENDIZAGEM GERENCIAL. **Gestão e Sociedade**, v. 4, n. 8, p. 619-639, 2010. Disponível em: <https://www.gestaoesociedade.org/gestaoesociedade/article/download/999/815>. Acesso em: 10 fev. 2022.

MENEGUIN, Fernando B. O que é o mercado de carbono e como ele opera no Brasil. **Brasil economia e governo**, v. 28, 2012. Disponível em: <http://www.brasil-economia-governo.org.br/wp-content/uploads/2012/08/o-que-e-o-mercado-de-carbono-e-como-ele-opera-no-brasil.pdf>. Acesso em 23 jun. 2022.

MME - Ministério de Minas e Energia. **RenovaBio**. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/acoes-e-programas/programas/renovabio>. Acesso em: 13 jun. 2022.

Penner, Giovanni Chaves, *et al.* **“AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE PROJEÇÃO POPULACIONAL PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE SANEAMENTO BÁSICO EM BELÉM DO PARÁ”**. Engenharia Ambiental e Sanitária: Interfaces do

Conhecimento 2, por Helenton Carlos da Silva, 1o ed, Atena Editora, 2019, p. 29–36. DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.9421909103>. Acesso em: 16 mai. 2022.

PIÑAS, Jean Agustin Velásquez. **Avaliação técnico-econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás em sistemas de digestão anaeróbia centralizada e descentralizada no Brasil**. 2016. 211 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

POLETTO FILHO, José Antonio. **Viabilidade energética e econômica da incineração de resíduo sólido urbano considerando a segregação para reciclagem**. 2008. 119 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/91712>. Acesso em: 01 jun. 2022.

SALOMON, Karina Ribeiro. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. 2007. 247 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007. Disponível em: <https://saturno.unifei.edu.br/bim/0032785.pdf>. Acesso em: 06 fev. 2022.

SALOMON, Karina Ribeiro. **Potencial de Geração de Energia a Partir de Biogás**. Maceió, 2019. 90 slides, color.

SANTOS, Amanda Lima Moraes dos. **Cadeia de Processamento de Mandioca: Tendências Mundiais de Tratamento dos Efluentes e Oportunidades de Melhorias na Linha de Produção de Uma Casa de Farinha do Estado de Alagoas**. 2021. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021.

SANTOS, Guilherme Garcia Dias dos. **Análise e Perspectivas de Alternativas de Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterros**. 2011. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,

2011. Disponível em:

http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Guilherme_Garcia_Dias_dos.pdf. Acesso em: 19 fev. 2022.

SANTOS, Marcos Vinícius da Silva; ALMEIDA, Ana Letícia Gaia da Rocha; SALOMON, Karina Ribeiro. **Quantificação do Potencial Teórico de Aproveitamento Energético do Biogás na CTR do Agreste - Craíbas, AL**. In: I Congresso de Recursos Energéticos e Meio Ambiente. Maceió, 2020.

SILVA, Ana Luiza Ferreira da **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás Produzido no Aterro Sanitário Metropolitano de Natal**. 2019. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. Disponível em: <https://monografias.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/9638/1/ENVIO_FINAL.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2020.

SILVA, Claudionor de Oliveira; KONRAD, Odorico; CALLADO, Nélia Henriques; ARAUJO, Liz Geise Santos de; HASAN, Camila. Resíduos sólidos urbanos de Maceió/AL: análise da composição gravimétrica sob influências sazonais. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 426-439, 2 abr. 2020. Companhia Brasileira de Produção Científica. <http://dx.doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2020.003.0033>. Disponível em: <http://www.sustenere.co/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2020.003.0033> Acesso em: 15 fev. 2022.

SILVA, Claudionor de Oliveira; KONRAD, Odorico; CALLADO, Nélia Henriques; FEITOSA, Anny Kariny; ARAUJO, Liz Geise Santos de. Discretização da estimativa de geração per capita e análise gravimétrica de resíduos sólidos urbanos. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 1-19, 28 jun. 2021. Centro Universitario de Maringa. <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n3e8128>. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Claudionor-Silva/publication/352800324_Discretizacao_da_estimativa_de_geracao_per_capita_e_analise_gravimetrica_de_residuos_solidos_urbanos_Differentiation_of_estimates_in_per_capita_generation_and_gravimetric_analysis_of_urban_solid_waste/links/60d

a55c492851ca94493f5c5/Discretizacao-da-estimativa-de-geracao-per-capita-e-analise-gravimetrica-de-residuos-solidos-urbanos-Differentiation-of-estimates-in-per-capita-generation-and-gravimetric-analysis-of-urban-solid-waste.pdf. Acesso em: 18 fev. 2022.

SILVA, Elissando Rocha da; TONELI, Juliana Tófano de Campos Leite; PALACIOS-BERECHE, Reynaldo. Estimativa do potencial de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos usando modelos matemáticos de biodigestão anaeróbia e incineração. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 347-357, abr. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019179023>.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/esa/a/9yLypv9jfnwK8QbyCjnd5qk/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 18 fev. 2022.

SILVA, Tiago Rodrigo *et al.* Methodology for the determination of optimum power of a Thermal Power Plant (TPP) by biogas from sanitary landfill. **Waste Management**, [S.L.], v. 65, p. 75-91, jul. 2017. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.018>. Disponível em:

[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X17302477?casa_token=](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X17302477?casa_token=9Xj1uiDv-)

[9Xj1uiDv-IYAAAAA:5EjJFeHTSsDbycZbdYmxKKhAQaBYeuCGKvOpaWPLEG_WIOM8yvOVgzuZROspK5d6QE4Tqqgbtras](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X17302477?casa_token=9Xj1uiDv-IYAAAAA:5EjJFeHTSsDbycZbdYmxKKhAQaBYeuCGKvOpaWPLEG_WIOM8yvOVgzuZROspK5d6QE4Tqqgbtras). Acesso em 02 jul. 2022.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Painel de Saneamento**. 2021. Disponível em: <http://snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-residuos-solidos>. Acesso em: 05 mai. 2022.

THEMELIS, N. J. et KAUFMAN S. M. **Waste in a Land of Plenty – Solid Waste Generation and Management in the US**. In: Waste Management World, Sep-Oct 2004, pp. 23-28. Tulsa, OK: Pennwell Publishing, 2003.

TSAI, Feng Ming; BUI, Tat-Dat; TSENG, Ming-Lang; LIM, Ming K.; HU, Jiayao. Municipal solid waste management in a circular economy: a data-driven bibliometric analysis. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 275, p. 124132, dez. 2020.

Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124132>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620341779>. Acesso em: 10 fev. 2022.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água** 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade, p. 643, 2006.