



Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Recursos Naturais da Amazônia

Viabilidade da geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos em pequenos municípios do estado do Pará

Jessé Luís Padilha

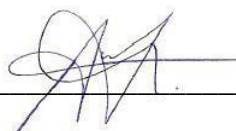
Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, PRODERNA/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

ORIENTADOR: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

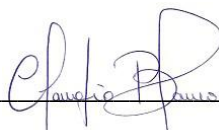
“Viabilidade da geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos em pequenos municípios do estado do Pará”

Jessé Luís Padilha

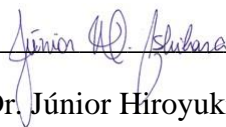
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓSGRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA - PRODERNA/ITEC/UFPA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.



Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
(Orientador – PRODERNA/UFPA)



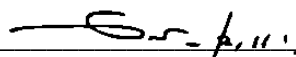
Prof. Dr. Claudio José Cavalcante Blanco
(Membro Interno – PRODERNA/UFPA)



Prof. Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara
(Membro Externo ao Programa – UFPA)



Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres
(Membro Externo à Instituição - UFBA)



Prof. Dr. Antônio César Pinho Brasil Júnior
(Membro Externo à Instituição - UnB)

Belém, PA - Brasil
Julho de 2022

Viabilidade da geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos em pequenos municípios do estado do Pará Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P123m Padilha, Jessé Luís.
Viabilidade da geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos em pequenos municípios do estado do Pará / Jessé Luís Padilha. — 2022. xiii, 108 f. : il. color.
Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais na Amazônia, Belém, 2022.
1. Resíduos sólidos urbanos. 2. geração de energia. 3. gestão de resíduos. 4. estado do Pará. 5. taxa de contribuição da população. I. Título.

CDD 621.042

Dedico aos meus pais, Joice Maria Padilha, José Renato Padilha (*in memoriam*) e meu irmão Pablo Rafael Padilha, “por me ensinarem a ser quem sou”, minha amada esposa Máira Vasconcelos da Silva Padilha pelo apoio e amor, “te amo pra sempre”, e minha filha Luísa Vasconcelos da Silva Padilha “meu amor da minha vida”.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Pará pela liberação para capacitação.

Ao meu orientador Prof. André Luiz Amarante Mesquita. Obrigado pelos seus ensinamentos, levarei pra toda vida, pela paciência e por nunca desistir de mim.

Ao meu grande amigo, David James Overal, sempre presente.

Ao amigo Rafael Suzuki Bayma que me ajudou em vários momentos.

William Leslie Overal e Iara Vasconcelos da Silva, no final do trabalho.

Aos amigos do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE) da Universidade Federal do Pará e Campus Universitário de Tucuruí (CAMTUC) pelo apoio.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais – PRODERNA.

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais (D.Eng.)

Viabilidade da geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos em pequenos municípios do estado do Pará

A disposição de resíduos sólidos urbanos mais comum no Brasil é o aterro sanitário. Além disso, ainda existem unidades de descarte inadequadas em aterros controlados (lixões), mas existem alternativas tecnológicas para esse descarte e projetos já estão instalados no Brasil. É fundamental identificar a opção tecnológica adequada por meio de análises econômicas, transformando um problema ambiental em uma solução viável. Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade financeira da combinação de destinos consolidados para a gestão de Resíduos Sólidos Urbanos identificados neste trabalho como rotas tecnológicas, que utilizam resíduos para energia, considerando inicialmente cidades de com população até 250.000 habitantes, posteriormente foi realizada uma análise de viabilidade utilizando as duas melhores rotas desta primeira análise em função do agrupamento de municípios paraenses tomando como base as distâncias, integridade das estradas e usabilidade ao longo do ano segundo o plano regional de resíduos sólidos do estado do Pará. Foi elaborado um algoritmo estruturado com foco na estimativa da receita a partir da taxa de contribuição da população (TCP), utilizando os indicadores econômicos: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Tempo de Retorno Descontado (TRD) e Custo Nivelado da Eletricidade (LCOE), foi realizada ainda uma análise de sensibilidade de todos os componentes de custo com base no VPL. Os melhores resultados são as rotas com aterro e gás de aterro, e com reciclagem e digestão anaeróbica, considerando a venda de digerido e posteriormente encaminhados ao aterro sanitário. Estas apresentaram os melhores valores financeiros, com payback descontado de 15 e 20 anos, TCP máximo de R\$ 0,22 e R\$ 1,82, por habitante/mês, respectivamente, com TIR de 11,61%, para ambos. A análise de sensibilidade indicou maior influência nos custos de investimento do gás de aterro sanitário e serviços de coleta e limpeza urbana para a rota de reciclagem, digestão anaeróbica, digestato e aterro sanitário. Com relação ao agrupamento de municípios, o percentual médio estimados dos gastos com a renda de meio salário mínimo da população foi em média um pouco acima dos 3 %.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos; geração de energia; gestão de resíduos; estado do Pará; taxa de contribuição da população.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Eng.)

Feasibility of generating energy from urban solid waste in small municipalities in the state of Pará

The most common urban solid waste disposal in Brazil is the landfill. Additionally, there are still inadequate disposal units (dumps), but there are technological alternatives for this disposal and some projects are already installed in Brazil. The economic analysis is therefore fundamental to find the best technological option, transforming an environmental problem into a viable solution. This work aims to analyze the financial viability of the combination of consolidated destinations for the management of Municipal Solid Waste (MSW) (technological routes), that use Waste-to-Energy (WTE), considering small cities with populations from 30,000 to 250,000 residents and later apply this analysis considering the grouping of municipalities in Pará, suitable according to the regional plan for solid waste in the state of Pará. A structured algorithm was used with a focus on estimating revenue from the minimum value of rate payers' contributions (RPC) to make these routes viable for most cities considered in the project. Economic indicators used include: Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Discounted Payback Period (DPP), and Leveled Cost of Electricity (LCOE). A sensitivity analysis of the two best routes was performed (depending on lower RPC values) based on NPV. The results tend to confirm solutions that can be approved not only by the government, but also by the business sector. The best outcomes are the routes with landfill and landfill gas, and with recycling and anaerobic digestion, considering the sale of digestate and landfill. These presented the best financial values, with discounted payback periods of 15 and 20 years, maximum RPC of US\$0.04 and US\$0.33, per inhabitant/month, respectively, with an IRR of 11.61%, for both. The sensitivity analysis indicated a greater influence on the investment costs of landfill gas for the first route and for the second route, the urban collection and cleaning services and the estimated average percentage of the population's half-minimum-wage income expenditure was on average a little above 3%.

Key-Words: Municipal solid waste; power generation; Waste Management; state of Pará; population contribution rate.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIACÕES	xiii
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	14
1.1. Motivação e justificativas	15
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo geral.....	17
1.2.2. Objetivos específicos	17
1.3. Delimitações do trabalho	18
1.4. Contribuições da tese	18
1.5. Estrutura e organização do trabalho.....	19
CAPÍTULO 2 REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1. Tecnologias para o tratamento de resíduos sólidos.....	20
2.1.1. Aterro sanitário	20
2.1.2. Reciclagem.....	21
2.1.3. Digestão anaeróbia (DA)	22
2.1.4. Gás de Aterro	24
2.1.5. Incineração	26
2.2. Tratamento de resíduos sólidos no Brasil	29
2.3. Geração de energia com resíduos sólidos urbanos	31
2.4. Otimização da gestão final de resíduos sólidos urbanos.....	32
2.5. Região de confiança -trust-region methods	34
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA.....	37
3.1. Apresentação da metodologia	37
3.2. Geração de resíduos sólidos urbanos.....	38

3.3. Geração de energia	39
3.3.1. Incineração	39
3.3.2. Digestão anaeróbica	39
3.3.3. Gás de aterro	40
3.4. Custos e receitas	41
3.5. Indicadores financeiros.....	42
3.5.1. Taxa Interna de Retorno.....	43
3.5.2. Tempo de retorno	43
3.5.3. Custo nivelado de eletricidade	43
3.6. Algoritmo de otimização	44
3.6.1. Bibliotecas.....	44
3.6.2. Dados de entrada	44
3.6.3. Equações de transformações, dimensionamento e viabilidade.....	46
3.6.4. Otimização.....	50
CAPÍTULO 4 VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA PARA PEQUENOS MUNICÍPIOS DO PARÁ	53
4.1. Rotas tecnológicas	53
4.1.1. Rota 1 – Aterro sanitário.....	54
4.1.2. Rota 2 – Aterro sanitário e gás de aterro.....	54
4.1.3. Rota 3 – Reciclagem, digestão anaeróbica e aterro sanitário.....	55
4.1.4. Rota 4 - Reciclagem, digestão anaeróbica com venda de digestato e aterro sanitário 55	
4.1.5. Rota 5 – Reciclagem, incineração e aterro sanitário.....	56
4.1.6. Rota 6 – Reciclagem, digestão anaeróbica, incineração e aterro sanitário	57
4.2. Resultados	57
4.2.1. TCP considerando o valor da venda de energia elétrica	59
4.2.2. Considerando comercialização de crédito de energia.....	61

4.2.3	Análise de sensibilidade.....	63
4.3.	Discussão.....	66
CAPÍTULO 5 AGRUPAMENTO DE MUNICIPIOS DO ESTADO DO PARÁ.....		68
5.1.	Resultados	73
5.1.1.	Região de integração - Araguaia.....	74
5.1.2.	Região de integração – Baixo Amazonas	76
5.1.3.	Região de integração – Guamá	78
5.1.4.	Região de integração – Carajás.....	80
5.1.5.	Região de integração – Lago de Tucuruí	82
5.1.6.	Região de integração - Marajó.....	84
5.1.7.	Região de integração - Guajará.....	86
5.1.8.	Região de integração – Rio Caeté.....	88
5.1.9.	Região de integração – Rio Capim	90
5.1.10.	Região de integração - Tocantins.....	92
5.2.	Discussão.....	94
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES		95
6.1.	Sugestões para trabalhos futuros	97
REFERÊNCIAS		98
APÊNDICE I.....		115
APÊNDICE II.....		116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de Digestão anaeróbia.....	23
Figura 2 - Planta de biogás de aterro	25
Figura 3 - Processo de Incineração.....	26
Figura 4 - Modelo esquemático do método de região de confiança.....	34
Figura 5 - Visão geral da metodologia	38
Figura 6 - Visualização do script de otimização	51
Figura 7 - Rotas tecnológicas	54
Figura 8 - Aterro com gás de aterro.....	55
Figura 9 - Reciclagem, digestão anaeróbica e aterro sanitário.....	55
Figura 10 - Reciclagem com digestão anaeróbica, venda de digestato e aterro sanitário	56
Figura 11 - Reciclagem com incineração e aterro sanitário	56
Figura 12 - Reciclagem com digestão anaeróbica, incineração e aterro sanitário.....	57
Figura 13 - Potência elétrica por rota	58
Figura 14 - LCOE.....	59
Figura 15 - Gastos estimados com TCP considerando venda de energia elétrica.....	59
Figura 16 - Custo mensal por habitante considerando a venda de energia elétrica.....	60
Figura 17 - Gastos estimados com TCP considerando créditos de energia.....	61
Figura 18 - Custo mensal por habitante considerando créditos de energia	62
Figura 19 – Tempo de retorno para a rota 2	62
Figura 20 - Taxa interna de retorno para rota 2.....	63
Figura 21 - Análise de sensibilidade da rota 1 em função do VPL	63
Figura 22 - Análise de sensibilidade da rota 2 em função do VPL	64
Figura 23 - Análise de sensibilidade da rota 3 em função do VPL	64
Figura 24 - Análise de sensibilidade da rota 4 em função do VPL	65
Figura 25 - Análise de sensibilidade da rota 5 em função do VPL	65
Figura 26 - Análise de sensibilidade da rota 6 em função do VPL	66
Figura 27 - Divisão regional do Estado do Pará.....	68
Figura 28 - Sugestão de destinação regional para RI-Araguaia	74
Figura 29 - Custo anual com TCP RI-Araguaia	74
Figura 30 - Custo por habitante mês RI-Araguaia	75
Figura 31 - Sugestão de destinação regional para RI-Baixo Amazonas	76

Figura 32 - Custo anual com TCP RI-Baixo Amazonas	76
Figura 33 - Custo por habitante mês RI-Baixo Amazonas.....	77
Figura 34 - Sugestão de destinação regional para RI-Guamá	78
Figura 35 - Custo anual com TCP RI-Guamá	78
Figura 36 - Custo por habitante mês RI-Guamá.....	79
Figura 37 - Sugestão de destinação regional para RI-Carajás.....	80
Figura 38 - Custo anual com TCP RI-Carajás.....	80
Figura 39 - Custo por habitante mês RI-Carajás	81
Figura 40 - Sugestão de destinação regional para RI-Lago de Tucuruí	82
Figura 41 - Custo anual com TCP RI-Lago de Tucuruí	83
Figura 42 - Custo por habitante mês RI-Lago de Tucuruí	83
Figura 43 - Sugestão de destinação regional para RI-Marajó	84
Figura 44 - Custo anual com TCP RI-Marajó	84
Figura 45 - Custo por habitante mês RI-Marajó.....	85
Figura 46 - Sugestão de destinação regional para RI-Guajará	86
Figura 47 - Custo anual com TCP RI-Guajará	86
Figura 48 - Custo por habitante mês RI-Guajará	87
Figura 49 - Sugestão de destinação regional para RI-Rio Caeté.....	88
Figura 50 - Custo anual com TCP RI-Rio Caeté.....	88
Figura 51 - Custo por habitante mês RI-Rio Caeté	89
Figura 52 - Sugestão de destinação regional para RI-Rio Capim	90
Figura 53 - Custo anual com TCP RI-Rio Capim	90
Figura 54 - Custo por habitante mês RI-Rio Capim.....	91
Figura 55 - Sugestão de destinação regional para RI-Tocantins	92
Figura 56 - Custo anual com TCP RI-Tocantins.....	93
Figura 57 - Custo por habitante mês RI-Tocantins	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Plantas WTE em operação no Brasil	32
Tabela 2 - Quantidade e composição de RSU	38
Tabela 3 - CAPEX e OPEX no Brasil	42
Tabela 4 - Receitas dos produtos comercializados no Brasil	42
Tabela 5 - Argumentos de função.	45
Tabela 6 - Principais informações levantadas	70

LISTA DE ABREVIACÕES

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVCC	avaliação do ciclo de vida de custos
DA	digestão anaeróbica
LCOE	custo nivelado de energia elétrica
PCI	poder calorífico inferior
TRD	tempo de retorno descontado
PROMETHEE	organização de classificação preferência para avaliações de enriquecimento
TRS	tempo de retorno simples
RSU	resíduos sólidos urbanos
TCP	taxas de contribuição da população
TIR	taxa interna de retorno
TOPSIS	técnica para ordem de preferência por similaridade à solução ideal
VIKOR	solução de compromisso Viekriterijumsko Kompromisno Rangiranje
VPL	valor presente líquido
WTE	Waste-to-Energy

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da população global e o desenvolvimento industrial criou-se uma demanda cada vez maior por bens de consumo, esses fatores se aglutinaram, resultando em um significativo aumento da produção diária de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil (SANTOS *et al.*, 2017), a maior parte destes RSU é descartado em aterros controlados de baixa qualidade e aterros sanitários (DA SILVA; TONELI; PALACIOS-BERECHE, 2019), segundo Luz *et al.* (2015) estas são as técnicas mais aplicada no Brasil, entretanto, também é comum descartar o “lixo” em áreas impróprias em vez de depositá-lo em lugares adequados, mesmo em áreas urbanas onde há um serviço de recolha regular, este descarte inadequado pode afetar negativamente o ambiente (ALFAIA; COSTA; CAMPOS, 2017).

Contudo, a geração de energia a partir dos RSU, a chamada tecnologia Waste-to-Energy (WTE), tem adquirido um papel fundamental para a sustentabilidade dos projetos de gestão de RSU em todo o mundo (BRUNNER; RECHBERGER, 2015; KAUR; BHARTI; SHARMA, 2021; KUMAR; SAMADDER, 2017), onde a determinação dos poderes caloríficos do combustível de RSU, são primordiais (BAGHERI *et al.*, 2019; SHI *et al.*, 2016), e avaliar manuseio adequando destes combustíveis a estas tecnologias também são (REZAEI *et al.*, 2020).

Entre as tecnologias WTE comercialmente disponíveis, a incineração (MAKARICHI; JUTIDAMRONGPHAN; TECHATO, 2018; TRINDADE *et al.*, 2018) e a digestão anaeróbica (PANIGRAHI; DUBEY, 2019; ZAMRI *et al.*, 2021) estão bem estabelecidas e podem até ser usadas em conjunto (CHEN *et al.*, 2022). Outras tecnologias WTE ainda estão em fase de desenvolvimento com alguns projetos em operação experimental como gaseificação (HAMEED *et al.*, 2021; KWON; IM, 2022), pirólise (HASAN *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2020), e algumas tecnologias híbridas, como digestão anaeróbica e pirólise (WANG *et al.*, 2021), gaseificação e digestão anaeróbica (MABALANE *et al.*, 2021).

No Brasil, a maioria dos aterros sanitários são geridos por empresas privadas que são contratadas pelo respectivo município, onde cada município paga (por massa) em relação à quantidade de material depositado (SELUR, 2014), e o orçamento alocado para este serviço é de 3 - 7% do orçamento total arrecadado pelo município, onde só o serviços de coleta de RSU consome 70 - 80% deste valor, sobrando pouco para gastar com a destinação final (LINO, 2009).

O descarte de resíduos sólidos é um problema tanto de áreas urbanas quanto rurais, sua gestão deve ser financeiramente sustentável, tecnicamente viável, socialmente, legalmente e

ambientalmente aceitável, e só será alcançada com investimentos, coordenação de ações e desenvolvimento de mercados de recuperação de recicláveis (ABDEL-SHAFY; MANSOUR, 2018).

Nas últimas décadas, a temática dos resíduos sólidos urbanos tem ganhado destaque no cenário ambiental. No Brasil, a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) estabeleceu um marco regulatório no setor de resíduos sólidos (BRASIL, 2010), e em seu artigo 19 afirma que os estados devem promover a regionalização e a gestão conjunta ou compartilhada dos municípios para reduzir custos e ganhar economias de escala.

1.1. Motivação e justificativas

O mundo tem deixado de visualizar os resíduos sólidos urbanos como um problema, passando a tratá-lo como um recurso, utilizando tecnologias que evitam a contaminação de recursos hídricos, bem como à saúde humana. (ABREN, 2019). A coleta domiciliar de resíduos sólidos no Brasil atende 98,8% da população urbana, sendo 38,1% por coleta seletiva, e 30,7% desse total coletado com a participação formal de catadores em parceria com o governo, com uma valorização de 124 mil toneladas em unidades de compostagem e 1,05 milhão de toneladas de resíduos recicláveis em unidades de reciclagem (BRASIL, 2020a).

Para verificar a atratividade destas destinações finais, se fazem necessários estudos de viabilidade econômica para prever cenários que poderão acontecer, usando estratégias e selecionando a melhor delas por meio de ferramentas de otimização (MADANI *et al.*, 2015). Estes cenários devem ser identificados considerando critérios técnicos, sociais, econômicos, ambientais e políticos (SANTOS *et al.*, 2017), e se interpretados de maneira correta podem gerar resultados futuros plausíveis (PALLOTTINO; SECHI; ZUDDAS, 2005), reduzindo os riscos.

Estas análises visam estabelecer as melhores opções, tendo em vista os custos e receitas de curto e longo prazo, geralmente para esta finalidade são utilizadas ferramentas de análises econômicas (ZHAO *et al.*, 2016): tempo de retorno do investimento (simples ou descontado), valor presente líquido, taxa interna de retorno custo nivelado de energia e Análises de Sensibilidade.

O desenvolvimento de novas tecnologias e mudanças no setor econômico, abrem oportunidades para estratégias de gerenciamento integrado de RSU, fazendo com que tomadores de decisões se questionem se o método de gerenciamento utilizado é o mais eficaz

para seus objetivos. Já que investimentos em algumas destas tecnologias podem ser consideradas críticas devido seu alto valor de implantação e operação, e perspectiva de longo prazo podem não gerar receitas positivas (MAYER; BREUN; SCHULTMANN, 2017).

Recentemente a Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, também chamada de novo marco regulatório do saneamento básico visa estimular a concorrência, privatização de empresas públicas estatais de saneamento e a desestatização do setor, entre outras inovações importantes para fazer face aos graves problemas ambientais e de saúde pública causados pela insuficiência do saneamento Brasileiro, tornando possível fontes de receitas alternativas, complementares ou acessórias, bem como as provenientes de projetos associados; repartição de riscos entre as partes; Possibilidade de subdelegação por meio de licitação e contratação de parceria público-privada no limite de 25% do valor do contrato, com possibilidades de remuneração dos serviços públicos de saneamento básico e principalmente assegurando a sustentabilidade econômico-financeira por meio da remuneração pelos serviços (BRASIL, 2020b)

Tomando este trecho da lei nº 14.026 em que fontes de receitas alternativas, complementares ou acessórias possam ser implementadas, e pensando que municípios com até 250.000 habitantes ou agrupamento de municípios próximos, possam utilizar destinações Waste-to-Energy como solução, este trabalho pretende estimar um valor de cobrança em função do custo cobrado por massa de material tratado. Neste trabalho denominado de taxa de contribuição da população (TCP).

Dois trabalhos recentes de viabilidade que determinam valores de cobrança de TCP e trabalham com agrupamentos para destinações WTE se destacando o de Fernández-González *et al.* (2017) na Espanha e Colvero *et al.* (2020) no Brasil. Fernandez-Gonzales não empregam em seus cálculos os custos com coleta e transporte que impactam diretamente no valor final do TCP. Já Colvero, apesar de realizar o levantamento de grande parte dos custos que compõem a gestão de RSU em um município, incluindo a coleta e transporte, trabalhou com os indicadores econômicos que não utilizam a taxa de desconto. Taxa esta composta pela soma dos custos de remuneração de capital, custo de oportunidade, riscos e inflação, e quando não aplicada não apresenta viabilidade dentro do prazo ao empreendimento.

Complementando tudo isso, o Brasil possui ainda um modelo particular de geração de energia regido pelas resoluções da ANEEL 482/2012 (ANEEL, 2012) e sua revisão 687/2015 (ANEEL, 2015), que possibilitam um sistema de compensação, onde o valor da energia elétrica renovável produzida pode ser deduzida do consumo total de energia fornecida pela concessionária. E com a recente legislação em vigor é possível enquadrar projetos WTE de

biomassa e biogás com potência instalada até 5 MW como autoconsumo local, na modalidade de minigeração distribuída para fontes despacháveis (DOU, 2022).

Observando-se essas possibilidades e verificando os desafios de aplicá-lo ao estado do Pará, que é o segundo maior estado da federação com 1.245.870,707 km², aproximadamente 14,5 % do território brasileiro, maior que a maioria dos países europeus, ficando atrás apenas da Rússia. Apesar de ser o nono estado mais populoso do Brasil, com população estimada em pouco mais de 8,5 milhões de pessoas distribuídas em 144 municípios, apresenta baixa densidade demográfica 6,07hab/km², a sétima menor do Brasil, considerando os 26 estados mais o distrito federal, somado a isso é o vigésimo quarto lugar quanto ao IDH brasileiro (0,646) (IBGE, 2022).

Estas características o colocam em uma situação onde existem municípios pouco populosos, muito distantes entre si, e com um IDH tão baixo, subtende-se saneamento, estruturas urbanas e estradas ruins.

Nesta perspectiva, o presente trabalho pretende em um primeiro momento estimar valores de TCP para destinações de RSU, considerando de até 250 mil habitantes, contabilizando os custos envolvidos na gestão RSU e aplicando uma taxa de desconto compatível com o mercado, que esteja dentro de um prazo viável, e em um segundo momento realizar esta análise em grupos de municípios paraenses pertencentes a Amazônia brasileira.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Analisar a viabilidade financeira da geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos com foco na otimização de receitas

1.2.2. Objetivos específicos

- Elaborar um algoritmo em Python utilizando método de otimização Trust-const para otimizar o valor mínimo dos indicadores econômicos, custos, receitas variáveis de dimensionamento que se façam necessárias e que viabilizem destinações finais de diferentes rotas tecnológicas de resíduos sólidos urbanos
- Avaliar a sustentabilidade financeira destas combinações de rotas de destinação para os RSU considerando um tempo de retorno descontado máximo do investimento;

- Calcular o custo por tonelada de resíduo processado e mensurar o valor da taxa de contribuição da população, custo nivelado de eletricidade, taxa interna de retorno, tempo de retorno descontado e o custo mensal por habitante que viabilize o sistema de gestão de RSU.
- Avaliar a viabilidade de rotas energéticas de destinação final de resíduos sólidos para pequenos municípios com até 250.000 habitantes.
- Analisar a viabilidade econômica de agrupamento de municípios pertencentes a Amazônia paraense, tomando como base o plano regional de resíduos sólidos do estado do Pará

1.3.Delimitações do trabalho

Foi realizada a análise financeira das rotas com foco exclusivo na taxa de contribuição da população, e considerando valores monetários próximos da realidade brasileira.

Não foram considerados custos e receitas além do tratamento primário dos resíduos (investimento e operação), nem variações de percentuais de e tipos específicos de resíduos ou de produtos de geração que não a geração elétrica.

Considerando o agrupamento de municípios foram utilizadas as informações presentes no plano regional de resíduos sólidos do estado de Pará do ano de 2012 e considerando um a renda mensal de meio salário mínimo brasileiro para o ano de 2022.

1.4. Contribuições da tese

A pesquisa elaborou inicialmente uma metodologia que otimiza indicadores econômicos e receitas mínimas que viabilizam destinações finais de resíduos sólidos urbanos, com aplicação para cidades com até 250 mil habitantes no Brasil, através de diferentes rotas tecnológicas.

Da metodologia desenvolvida gerou-se a seguinte publicação (APÊNDICE I):

Padilha, J.L., Amarante Mesquita, A.L. Waste-to-energy effect in municipal solid waste treatment for small cities in Brazil. *Energy Conversion and Management* 265 (2022) 11574.

A partir destes resultados preliminares, foi possível verificar a viabilidade financeira das rotas de destinação para resíduos sólidos considerando o agrupamento de municípios paraenses. Estes resultados podem servir de base para o planejamento do Governo do Estado do Pará ou

de municípios paraenses, para a implantação de sistemas de tratamento, como estabelecido na recente Lei 14.026/2020.

1.5. Estrutura e organização do trabalho

Esta proposta de tese de doutorado está organizada da seguinte forma: o Capítulo 1 versa sobre as considerações iniciais, a motivação do trabalho, seus objetivos, contribuições da tese e a estrutura do trabalho. No Capítulo 2 são abordadas as principais tecnologias para tratamento WTE, o estado da arte acerca dos trabalhos no Brasil e no mundo a geração de energia a partir de RSU no Brasil, o estado da arte dos trabalhos de otimização aplicados a RSU no mundo e uma breve explicação sobre o método de região de confiança. No Capítulo 3 a metodologia e suas etapas referentes ao algoritmo e considerações utilizadas neste trabalho. No Capítulo 4 uma análise da viabilidade de destinações WTE considerando municípios com até 250 mil habitantes. No Capítulo 5 uma proposta de agrupamento de municípios do estado do Pará com resultados considerando as regiões de integração do estado Pará. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões. E finalmente, no Apêndice II é apresentado código elaborado para realizar o presente estudo.

CAPÍTULO 2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Tecnologias para o tratamento de resíduos sólidos

As tecnologias mais utilizadas para o tratamento de RSU são agrupadas basicamente de 3 formas: tratamentos mecânicos composto por reciclagem e produção de combustível derivados de resíduos, tratamento bioquímico: biodigestão anaeróbica, compostagem e gás de aterro) e tratamentos térmicos: incineração, pirólise e gaseificação, as principais serão mais detalhadas a seguir, e por fim, o que não pode ser tratado ainda, é destinado ao aterro sanitário.

2.1.1. Aterro sanitário

Aterros sanitários são locais onde ocorre o descarte controlado de resíduos reduzindo o impacto negativo ao meio ambiente, devendo evitar a infiltração nas águas subterrâneas, devido a decomposição dos resíduos orgânicos. Estudos de ISWA (2012) indicam que aterros sanitários tem um maior impacto ao meio ambiente se comparados com destinações energéticas, como contaminação de rios ou próximos de centros urbanos (MÜLLER *et al.*, 2015). É considerada uma solução simples, acessível e muitas vezes insalubres para a eliminação da crescente quantidade de resíduos e é a prática comum nos países em desenvolvimento, representando uma ameaça grave para o ambiente (WANG; GENG, 2015).

Em muitas partes do mundo é a escolha mais econômica em comparação com o alto custo de outros tratamentos, devendo possuir um sistema de contenção para separar os resíduos do subsolo e um sistema de coleta e gestão de lixiviado e gás, bem como cuidado após fechamento com monitoramento destas emissões, um sistemas de recebimento de água subterrânea, água superficial, solo e ar, variando significativamente de um país para outro quanto a gestão do pré-tratamento antes do depósito de lixo, e no pós- cuidados de fechamento para garantir a proteção da saúde humana e do ambiente (TEIXEIRA *et al.*, 2014).

Ainda são considerados uma via de tratamento “barata” adotada pelas autoridades locais, especialmente em países moderados e pobres (LINO; ISMAIL, 2018), devido seus custos relativamente baixos se comparado com plantas utilizando a recuperação de energia (MAIER; OLIVEIRA, 2014).

A prática de disposição final em aterros sanitários é desencorajada por alguns autores devido à produção de chorume e emissão de poluentes, aliadas à escassez de espaços adequados

e consequentes avanços de tecnologias e urbanização (AZIZ; OTHMAN; ABU AMR, 2013), entretanto a existência de aterros sanitários é sempre necessária em função da produção final de resíduos pela execução de qualquer atividade, inclusive os resíduos de sistemas de conversão de energia e reciclagem (HADIDI; OMER, 2017).

A falta de critérios e procedimentos para avaliar a conclusão do aterro sanitário torna difícil para os órgãos reguladores tomarem decisões para encerrar, estender ou reduzir o período de pós-atendimento (LANER *et al.*, 2012), e vem sendo discutida a cobrança de taxas de deposição e responsabilização de grandes geradores (CAIADO *et al.*, 2017; MEDINA JIMENEZ *et al.*, 2017).

2.1.2. Reciclagem

Os sistemas de reciclagem auxiliam nos processos de separação e recuperação de resíduos para reaproveitamento na fabricação de novos produtos por meios mecânicos ou em outros processos de reaproveitamento. Um dos principais problemas identificados neste processo é muitas vezes a degradação e heterogeneidade do material (MASTELLONE, 1999). Esta solução auxilia na mitigação de danos ao meio ambiente, além de possuir um cunho social em cooperativas/associações (CIDADE; OLIVEIRA, 2017).

A reciclagem é um dos processos de tratamento, que começa com a coleta seletiva de RSU nas residências e termina na indústria onde o reciclável é transformado em material secundário. Dessa forma, papéis, papelões, plásticos, vidros e metais voltam à cadeia produtiva com economia de energia (LINO; ISMAIL, 2018). É um problema multidisciplinar que precisa ser considerado em diferentes níveis de decisão simultaneamente, seu sucesso depende de sua capacidade de transformar consistentemente resíduos de materiais em produtos de alta qualidade e comercializáveis, garantindo um mercado estável para os produtos finais (BAEYENS; BREMS; DEWIL, 2010).

O processo de reciclagem consiste em: corte/trituração; separação de contaminantes; moagem; lavagem; secagem, logo após o produto ser recolhido, quer para ser armazenado e vendido mais tarde, ou ainda enviado para processamento adicional (AZNAR *et al.*, 2006). De modo geral envolve a redução do tamanho do material a uma forma mais apropriada (pellets, ou apenas sua compactação).

A separação dos recicláveis na fonte é considerada uma etapa importante no processo de reciclagem, e depende inteiramente do modelo de atuação e adesão da população aos programas de coleta seletiva (CHALLCHAROENWATTANA; PHARINO, 2016).

A reciclagem se origina por obrigação legal e para reduzir externalidades negativas. Os custos e as despesas desses incluem pontos de entrega, transporte e custos operacionais, que excedem a receita da venda do material reciclado. A importância do Estado surge para impor a logística reversa, repassando o custo para o consumidor. Assim, à medida que os consumidores optam por consumir mais, eles vão pagar mais, acarretado em uma redução na geração de resíduos (REBEHY *et al.*, 2019).

Quanto a reciclagem o processamento de resíduos plástico é mais simples quando a rota é reciclar e reutilizar, principalmente quando for possível separar estes resíduos, porém deve se levar em consideração que quanto maior a infraestrutura, mais caro é o processo de coleta e separação, (SURESH *et al.*, 2018), assim, a variabilidade e o custo de investimento são os principais problemas.

2.1.3. Digestão anaeróbia (DA)

Tecnologia de conversão biológica baseada na decomposição microbiana da matéria orgânica biodegradável (putrescível) e elevado teor de umidade (TSUNATU *et al.*, 2015). Se trata de uma tecnologia ambientalmente adequada para a recuperação de energia a partir de resíduos, sendo um processo de conversão bioquímica, devendo ser precedido de segregação e coleta na fonte (OGUNJUYIGBE; AYODELE; ALAO, 2017).

A digestão anaeróbia ou biometanização (Figura 1) ocorre na ausência de oxigênio, produzindo biogás e estabilizando o lodo, com composição aproximada de 60% de metano e 40% de dióxido de carbono (juntamente com vestígios de gases tais como sulfureto de hidrogênio e de água) (ZHANG *et al.*, 2014). Nos últimos anos o potencial de aquecimento global do biogás tem se destacado como um elemento central das alterações climáticas e políticas de energia renovável em muitos países (CURRY; PILLAY, 2012).

O processo de DA ocorre em quatro etapas principais: Pré-tratamento, digestão de resíduos, recuperação de gás e tratamento de resíduos (MUSTAFA; POULSEN; SHENG, 2016). Devido à forma heterogênea (mista) do RSU, o pré-tratamento é altamente necessário para obter matéria-prima homogênea antes de alimentar o digestor. O pré-tratamento envolve a separação (classificação) de materiais não degradáveis do fluxo de resíduos e trituração. A separação pode ser na fonte ou por método mecânico. A concentração de metano é entre 55 e 70% em volume no biodigestor (HILKIAH IGONI *et al.*, 2008).

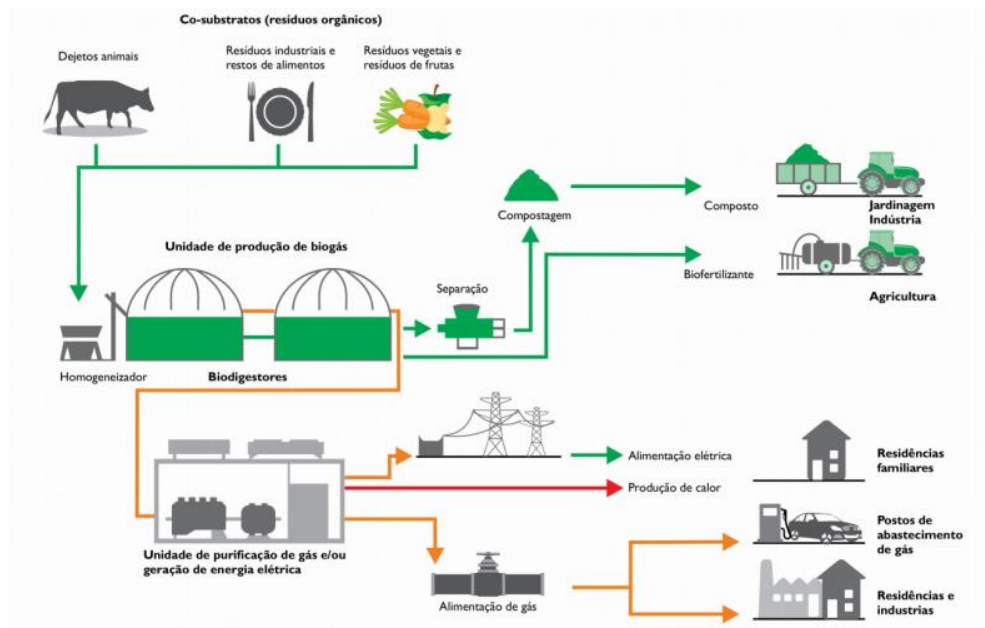


Figura 1 - Processo de Digestão anaeróbia
 Fonte: (SEMA RS, 2020)

A separação de resíduos garante a remoção de componentes inertes, não degradáveis e recicláveis (como plástico, vidro, metal, pedras, etc.) da matéria-prima para que o restante orgânico degradável (resíduos de alimentos, resíduos de quintal, etc.) possa ser alimentado no digestor. No entanto, o alto teor de lignina do papel e do material lenhoso os torna inadequados para o processo de digestão anaeróbia (NIZAMI, 2012).

A escolha do tipo de digestor depende de uma série de fatores, como o teor de umidade da matéria-prima (úmida ou seca), o teor de sólidos na matéria-prima (alto ou baixo teor de sólidos), a taxa de alimentação (lote ou contínua), temperatura de operação, a complexidade do sistema (um ou mais estágios). Existem várias nações ao redor do mundo que estão utilizando a tecnologia de digestor anaeróbio, especialmente na Europa para o tratamento de RSU. O principal desenvolvimento da tecnologia DA está na Alemanha, Suíça e Dinamarca, onde várias empresas de digestores anaeróbios que tratam de RSU foram implementadas com sucesso (AYODELE; OGUNJUYIGBE; ALAO, 2018).

O biogás pode ser usado em diversas escalas de níveis domiciliares desde faixas entre 1 e 6 m³ a níveis industriais > 10.000 m³ (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011). Historicamente, a produção de biogás era visualizada como um subproduto de estações de tratamento de águas residuais e somente nas últimas décadas o mercado de biogás de substratos sólidos cresceu. A razão para este rápido crescimento é o reconhecimento da vantagem de produção de biogás, ou seja, redução da fração de resíduos, gerando simultaneamente energia e fertilizantes valiosos. (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011).

Sua forma mais usual de utilização é em motores ou turbinas a gás injetadas a rede elétrica ou na forma de calor, seu resíduo o digestato é uma mistura de biomassa não digerida produzido em grandes quantidades e pode ser utilizado como fertilizante (MONLAU *et al.*, 2015), entretanto a heterogeneidade do substrato gera dificuldade em manter o controle de qualidade (ZHANG *et al.*, 2014), sendo necessário acompanhar sua composição química, evitando a contaminação do solo (ZIRKLER; PETERS; KAUPENJOHANN, 2014).

O restante da matéria sólida consiste principalmente em materiais plásticos e celulósicos, que geram combustível derivado de resíduos (CDR) e resíduos inertes após a bio-secagem e separação mecânica (FEI *et al.*, 2018).

Muitas indústrias e investidores veem na produção de biogás para geração de energia como um investimento de alto risco devido às variabilidades inerentes no fornecimento de matéria-prima, características da matéria-prima, segregação de resíduos sólidos, problemas operacionais e problemas de capacidade (SCHMIDT; DABUR, 2014).

Os custos de investimento para digestão anaeróbia são consideravelmente mais baixos do que os sistemas WTE termoquímicos. Embora o digestato seja potencialmente um subproduto de DA valioso, há alguma incerteza no mercado, no Reino Unido e Índia tiveram que distribuir gratuitamente o digestato aos agricultores (YAP; NIXON, 2015).

2.1.4. Gás de Aterro

Todo o gás é um subproduto da degradação anaeróbica da matéria orgânica dos resíduos depositados nos aterros sanitários, a matéria orgânica no aterro se decompõe por processos biológicos e químicos formando biogás, que é uma mistura de metano (CH₄), Dióxido de carbono (CO₂), Nitrogênio (N₂), Hidrogênio (H₂), Gás sulfúrico (H₂S) Oxigênio (O₂). (REDDY, 2011). A matéria orgânica nos resíduos é oxidada pelo oxigênio atmosférico para produzir dióxido de carbono e vapor de água.

Essas tecnologias seguem a decomposição biológica de materiais orgânicos degradáveis (ou seja, fração orgânica de resíduos sólidos urbanos), resíduos animais, lodo de esgoto industrial, águas residuais, resíduos agrícolas e resíduos ou culturas energéticas sob influência de microrganismos em uma condição de falta de oxigênio (AGUILAR-VIRGEN *et al.*, 2014), conforme mostrado na Figura 2.

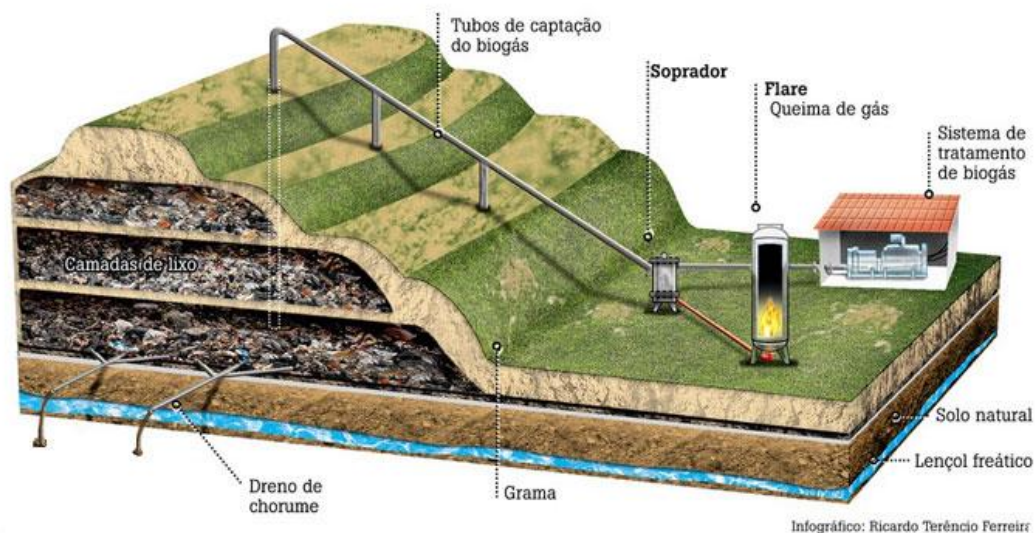


Figura 2 - Planta de biogás de aterro

Fonte: (RAC, 2018)

A tecnologia de gás de aterro apresenta como vantagens: ser mais econômico, em comparação as demais tecnologias de geração de energia, o gás produzido pode ser aproveitado para geração de energia ou aplicação térmica direta, dispensa pessoal qualificado. Em muitos casos, por razões de segurança, o gás acumulado em aterros sanitários e lixões são coletados e queimados (flared) para evitar explosões e outros tipos de acidentes (TOZLU; ÖZAHİ; ABUŞOLLU, 2016).

O gás purificado pode ser alimentado em um motor para geração de eletricidade e calor, ou em uma caldeira para água quente, produção de vapor e/ou como combustível para motores automotivos e estacionários (RAJAEIFAR *et al.*, 2017). Os motores de combustão interna são os mais usados para geração de eletricidade em projetos de recuperação, onde a produção de gás pode gerar de 100kW a 3MW. No entanto, para locais que são capazes de produzir mais de 3 MW de eletricidade, vários motores são necessários (LMOP, 2021).

As formas de se gerar gás de aterro podem ser por meio do sistema de coleta de gás usando uma bomba mecânica, criando um vácuo na rede de poço vertical e/ou horizontal (AMINI; REINHART, 2011), ou obtendo de hidrogênio renovável (H₂) através de tecnologias de reforma catalítica alimentando uma célula de combustível (ALVES *et al.*, 2013).

É bem conhecido que ambas as tecnologias de recuperação de digestão anaeróbios (biodigestor) e de gás de aterro requerem insumos semelhantes (biomassa orgânica biodegradável) para atingir uma produção semelhante (biogás e gás de aterro), mas por meios diferentes. Como as técnicas são diferentes, o custo de implantação do projeto, a quantidade de

biogás gerado e o benefício ambiental/potência para as duas tecnologias sejam diferentes (AYODELE; OGUNJUYIGBE; ALAO, 2018).

2.1.5. Incineração

As usinas de incineração (Figura 3) de resíduos geram calor e/ou eletricidade a partir da queima de resíduos sólidos urbanos em grandes fornos, que podem ser projetados de acordo com o poder calorífico inferior (PCI) do combustível utilizado, dependendo da homogeneidade do combustível e do seu teor de umidade. Quanto maior o Poder Calorífico Inferior (PCI) maior sua capacidade de gerar eletricidade.

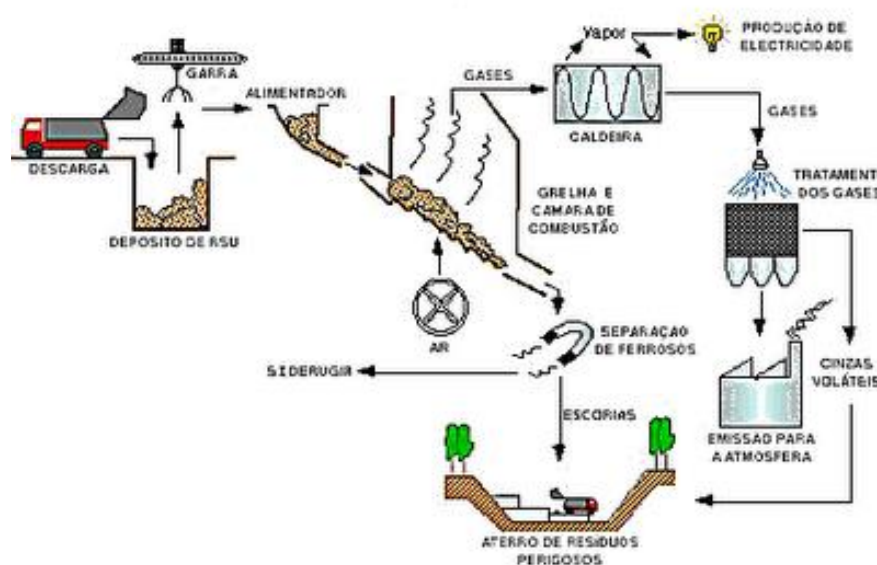


Figura 3 - Processo de Incineração

Fonte: (ITEC, 2011)

A incineração é a tecnologia de processamento térmico de RSU para produção de energia mais utilizada em países desenvolvidos, envolvem a decomposição térmica da matéria orgânica para produzir energia, óleo combustível ou gás, sendo úteis para resíduos menos densos com alta porcentagem de matéria orgânica, materiais não biodegradável e baixo teor de umidade (TSUNATU *et al.*, 2015). No processo de incineração, a energia é liberada diretamente na forma de calor, enquanto nos processos de outras tecnologias como a de pirólise e gaseificação os combustíveis líquidos e gasosos catiônicos são produzidos podendo ser usados para gerar energia (BAJIC *et al.*, 2015). O tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos (RSU) é considerado um elemento-chave para a gestão sustentável de resíduos (BRUNNER; RECHBERGER, 2015).

A incineração é uma rota tecnológica de resíduos na qual, a massa e o volume de resíduos podem ser reduzidos em 70% e 90% respectivamente (LOMBARDI; CARNEVALE; CORTI, 2015), ao mesmo tempo, calor e/ou eletricidade podem ser produzidos, com o avanço no controle de poluição do ar. A incineração é agora considerada como uma opção de tratamento de resíduos atraente, especialmente nos países desenvolvidos (OUDA *et al.*, 2016).

O principal objetivo do processo de incineração é fazer com que o oxigênio reaja com os componentes combustíveis que estão presentes nos resíduos (oxigênio, carbono, enxofre) em temperaturas acima de 800 °C por dois segundos para converter RSU em CO₂ e vapor de água, voláteis e cinzas sólidas contendo uma pequena quantidade de resíduo carbono, convertendo assim sua energia química em calor. Resíduos sólidos com alto valor calorífico são os encontrados em plásticos, papel e borracha (REDDY, 2011).

As cinzas resultantes da combustão da mistura de materiais no RSU correspondem a 10% em volume ou 20 - 30% em massa de RSU, normalmente são produzidos dois tipos: cinza de fundo e cinza volante. As cinzas volantes em suspensão são tratadas e removidas dos gases de exaustão. A cinza de fundo é geralmente inerte, sendo reutilizada na fabricação de cimento, material de construção, cerâmica, etc (REDDY, 2011).

CPHEEO (2000) afirma que uma planta de incineração de 300 toneladas por dia requer aproximadamente 0,8 hectares de terra. As eficiências de conversão gerais estão normalmente em torno de 18-26% (LOMBARDI; CARNEVALE; CORTI, 2015). A incineração de resíduos com alto teor de umidade pode levar a perdas de energia por meio da secagem. Portanto, este tipo de tecnologia não apresenta bom desempenho com combustíveis com alta umidade (40-60%) e baixo valor calorífico (800-1100 kcal/kg) (UNNIKRISHNAN; SINGH, 2010).

Seu funcionamento é semelhante ao das usinas de combustível fóssil (OFORI-BOATENG; LEE; MENSAH, 2013), consistem basicamente em uma câmara de armazenamento de resíduos, uma caldeira/incinerador, uma turbina a vapor/gerador, um sistema de limpeza de gases de combustão e um sistema de tratamento de resíduos (ZHENG *et al.*, 2014).

Os incineradores mais utilizados em todo o mundo são baseados em grelha fixa ou de leito fluidizado, com fornos rotativos e fornos de gaseificação e de pirólise. Seu design têm uma influência direta sobre os efeitos do descarte de RSU e benefícios econômicos (ZHENG *et al.*, 2014).

Atualmente, a maioria das instalações de incineração ainda adotam tecnologias de combustão de grelha fixa, a maioria delas tem capacidade de incineração média (500

toneladas/dia) ou grande (1000 toneladas/dia) por forno, os sistemas são normalmente usados nas cidades economicamente mais desenvolvidas, são usadas para RSU com poderes caloríficos relativamente altos (ZHENG *et al.*, 2014).

Quanto a tecnologia de combustão em leito fluidizado, a china dispõe de um grande acervo, onde os mesmos possuem custos operacionais mais baixos em comparação aos baseados em grelhas fixas e permitem facilmente a queima de RSU, sendo cada vez mais adotados em cidades de pequeno e médio porte (ZHAO *et al.*, 2016). Embora o desenvolvimento da tecnologia de leito fluidizado na China seja promissor, as capacidades de tratamento de tais incineradores até agora estão limitadas à faixa de 100-500 toneladas/dia (CHENG; HU, 2010)

A incineração em leito fluidizado tem como vantagens ser adaptável a uma ampla variedade de tipos de resíduos. A técnica é adequada para queimar resíduos de alta umidade com baixo poder calorífico (VAN CANEGHEM *et al.*, 2012), carecendo de melhorias por não ser tão madura e estável quanto a planta WTE baseada em grelha fixas (ZHENG *et al.*, 2014), principalmente quanto a geração de cinzas volantes, sendo necessário instalações de depuração de gás de combustão mais robustas (CHEN; CHRISTENSEN, 2010).

Como vantagens da incineração, há a utilização das cinzas na construção de estradas e de produção de cimento (MORF *et al.*, 2013), destruição completa de todos os organismos vivos e a mineralização de substâncias orgânicas em produtos finais inofensivos (BRUNNER; RECHBERGER, 2015). Plantas de incineração tem benefícios sociais significativos na recuperação de energia, conservação de terras, criação de empregos, mitigação de gases de efeito estufa, podendo ser combinando a reciclagem por meio de programas de recuperação de metal ferroso no local (DA SILVA ALCÂNTARA FRATTA; DE CAMPOS LEITE TONELI; ANTONIO, 2019).

Como desvantagens estão seu custo e a heterogeneidade dos resíduos sólido urbanos, seu teor de umidade, se fazendo necessário o pré-tratamento (térmica, mecânica, química e biológica) de resíduos para remover este excesso de umidade, além de elementos inertes residuais e tóxicos tais como o cloro e mercúrio e emissão de substâncias tóxicas e perigosas (OUDA *et al.*, 2016).

Independente do incinerador, o ciclo de Rankine é um processo mais comum para converter calor de baixa e média temperatura em eletricidade, tecnologia esta que tem enorme potencial econômico para suprir uma parte notável da necessidade energética de pequenos municípios (TOZLU; ÖZAHİ; ABUŞOLLU, 2016).

Estima-se que 100.000 m² de terra são suficientes para tratar uma planta de incineração com cerca de um milhão de toneladas de RSU por ano, enquanto a mesma quantidade de RSU em aterro sanitário exigiria 100.000 m² cada ano (PIROTTA; FERREIRA; BERNARDO, 2013), assim a planta de incineração se torna uma estratégia promissora. Uma vez que o aterro não pode ser usado para mais nada por um longo período após seu uso, e novos campos verdes devem ser convertidos em aterros. No entanto, as plantas de incineração não exigem mais terreno do que o requerido inicial e o terreno necessário é menor do que aterros que descartam a mesma quantidade (PSOMOPOULOS; BOURKA; THEMELIS, 2009).

2.2. Tratamento de resíduos sólidos no Brasil

No Brasil no ano de 2019 aproximadamente 75,1% do RSU foi disposto em aterros sanitários, o que corresponde a do total aproximado de 64 milhões de toneladas, o restante 24,9% em unidades de disposição final consideradas inadequadas (aterros controlados e lixões) (BRASIL, 2020a).

Com o objetivo de realizar uma revisão da literatura que valide este trabalho, foram verificados artigos científicos na base de dados Scopus com o texto de busca: “resíduos sólidos” E “gestão” E “econômica” E “viabilidade” entre os anos de 2012 e 2022 e artigos correlatos dentro de revistas científicas indexadas focando em trabalhos de viabilidade, tratamento e gerenciamento de resíduos sólidos, pode ser verificado nos trabalhos a seguir.

Mudanças potenciais nas políticas de resíduos sólidos para a redução de gases de efeito estufa para o Brasil e o estado do Rio de Janeiro, analisando um horizonte de 2005 a 2030 (LOUREIRO; ROVERE; MAHLER, 2013).

Análise comparativa do desempenho das áreas formais e informais que lidam com resíduos sólidos no Brasil, avanços nas áreas relacionadas à reciclagem (CAMPOS, 2014).

Análise da viabilidade técnico-econômica da gaseificação para Municípios brasileiros, classificando-os em subgrupos populacionais, sugerindo taxas pagas pelos municípios brasileiros para disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários e por meio de créditos de carbono (LUZ *et al.*, 2015).

Apresentação de arranjo institucional sustentável baseado na cooperação entre os agentes, com um uso intensivo de tecnologia da informação, logística e avaliando a viabilidade financeira (REBEHY *et al.*, 2017).

Comparação dos impactos ambientais de alternativas de gestão para a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos usando a metodologia de avaliação do ciclo de vida, aplicando uma abordagem atribucional e consequential (BERNSTAD SARAIVA; SOUZA; VALLE, 2017).

Elaboração de cenários para tratamento de resíduos considerando valorização energética e inclusão social, indicando a biodigestão e a incineração no auxílio da geração de eletricidade em Campinas (LINO; ISMAIL, 2018).

Avaliação do mercado de resíduos sólidos recicláveis em 16 cidades do Brasil. Por meio da aplicação de entrevistas, pesquisa de campo e coleta de dados secundários (MEIRA DE SOUSA DUTRA; HARUE YAMANE; RIBEIRO SIMAN, 2018).

Análise da evolução do sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos de João Pessoa, seu estudo analisou o efeito das decisões políticas na última década sobre coleta seletiva (IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2018).

Análise passo a passo da gestão de RSU do consórcio da microrregião de São Lourenço (MG). Utilizando o software WARM (USEPA) na avaliação de emissões de gases de efeito estufa, viabilidade econômica para a geração de energia a partir do biogás do aterro (LFG), viabilidade esta, apenas alcançada para cenários em que considerou-se o modelo de créditos de energia (PIN *et al.*, 2018).

Viabilidade técnica e econômica de quatro diferentes acordos setoriais de logística reversa implantados no Brasil, demonstrando que a viabilidade econômica dos sistemas de logística reversa são obtidos quando os resíduos têm valor comercial após o consumo (embalagens e eletrônicos de consumo) ou quando as indústrias se organizam para cobrar uma taxa que cubram os custos de reciclagem e transporte (lâmpadas e medicamentos) (REBEHY *et al.*, 2019).

Avaliação do ciclo de vida abordando o desempenho ambiental de potenciais caminhos de desenvolvimento para sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos em Campo Grande, Brasil (DE MORAIS LIMA *et al.*, 2019).

Geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos e análise econômica de tecnologias WTE (SANTOS *et al.*, 2019).

Análise energética e econômica, efetuando cálculos para diferentes grupos populacionais com o objetivo de determinar uma população mínima para viabilizar uma instalação de incineração, o potencial energético foi estimado em função da tarifa de energia (SILVA *et al.*, 2020).

Análise econômica de uma proposta compartilhada e gestão de resíduos sólidos urbanos para 19 municípios situados na região metropolitana de Goiânia e microrregiões vizinhas (COLVERO *et al.*, 2020).

Avaliação de diferentes cenários de mitigação de emissões de GEE na gestão de RSU no Brasil, em nível nacional e municipal, para determinar a melhor transição para atingir ecoeficiência em relação ao cenário atual, utilizou para isso Indicadores ambientais (emissões de GEE) e econômicos (custos operacionais e de investimento e externalidades das mudanças climáticas) (PAES *et al.*, 2020).

Observa-se que no Brasil apesar de apresentar trabalhos diversificados quanto a gestão, viabilidade, mercado de recicláveis ciclo de vida e experiências pontuais em cidades, contudo ainda são poucos os trabalhos publicados em revistas em se tratando de tratamento de RSU. com isso este trabalho verificou que trabalhos de gestão considerando diversos cenários de destinações finais podem ser explorados para a realidade brasileira.

2.3. Geração de energia com resíduos sólidos urbanos

Segundo ECOPROG (2021) existem mais de 2.500 usinas WTE de incineração em operação em todo o mundo, mais de 90% das usinas de tratamento térmico utilizam a tecnologia da incineração por combustão em grelhas móveis (mass burning), nos Estados Unidos existem 87 plantas de tratamento térmico de resíduos, sendo que 26% são reciclados, 9% destinados a processos de compostagem, 13% destinados para usinas WTE e 52% para aterros sanitários. (SWANA, 2018), no Japão 1.072 (muitas de pequeno porte), 522 na União Europeia, 339 na China, 20 na Índia (ABREN, 2019).

O potencial brasileiro de incineração ou mesmo de digestão anaeróbia é praticamente inexplorado, apenas 0,03% dos resíduos coletados são tratados em instalações de incineração, a maior parte para tratamento de resíduos perigosos e hospitalares (CARNEIRO; GOMES, 2019), no entanto instalações WTE carecem de infraestrutura adequada, sistema de controle da poluição e manutenção, sendo essenciais requisitos e regulamentos, e em menor escala políticas, regulamentações governamentais e apoio financeiro reforçam negativamente o cenário de instalações WTE (KUMAR; SAMADDER, 2017).

No Brasil apenas 2% do RSU é reciclado e o restante depositado em aterros a lixões, com plantas de captura de biogás em aterro sanitário para geração de eletricidade ou biometano, mas não possui nenhuma planta WTE de incineração de grande porte em operação, possui no entanto

plantas de coprocessamento em operação que utilizam Combustível Derivado de Resíduo (CDR), possuindo tecnologias nacionais e importadas de gaseificação e pirólise para tratar especificamente resíduos industriais perigosos (ABREN, 2019).

O Brasil possui um grande potencial para atendimento de pequenos e médios municípios por meio da geração distribuída de usinas WTE, utilizando tecnologias de gaseificação, pirólise e biodigestão, mas não apresentam nenhum caso de sucesso (ABREN, 2019).

A Tabela 1 apresenta os projetos WTE em operação no Brasil de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). São apresentados 29 projetos de geração de energia, sendo todos os projetos de gás de aterro com destaque para o estado de São Paulo, com 12 projetos totalizando 89,3MW em capacidades que variam de 30 KW a 30 MW, sendo o primeiro projeto em operação no ano de 2002.

Tabela 1 – Plantas WTE em operação no Brasil

Fonte: (ANEEL, 2022)

Destinação WTE	Estado	Unidades	Ano de entrada em operação	Potência outorgada (MW)
Gás de aterro	SP	12	2002	89,3
Gás de aterro	PE	1	2019	25,7
Gás de aterro	RJ	4	2003	24,2
Gás de aterro	BA	1	2010	19,7
Gás de aterro	MG	5	2009	19,5
Gás de aterro	RS	1	2015	12,7
Gás de aterro	PR	1	2016	10
Gás de aterro	PB	1	2019	5
Gás de aterro	SC	2	2021	7,0
Gás de aterro	DF	1	2020	2,8

2.4. Otimização da gestão final de resíduos sólidos urbanos

Também foi realizada uma revisão da literatura na base de dados Scopus com o texto de busca: “resíduos sólidos“ E “gestão” E “econômica” E “viabilidade” verificando artigos científicos entre os anos de 2012 e 2022 e artigos correlatos dentro de revistas científicas indexadas focando agora em trabalhos de otimização voltados para resíduos sólidos urbanos, mencionados a seguir.

Modelos de otimização utilizando cálculos próprios: com foco em estratégias de gestão (BROITMAN; AYALON; KAN, 2012), quantificação e caracterização dos fluxos de resíduos

sólidos urbanos, para diferentes destinações, triagem mecânica avançada, recuperação de material e tratamento térmico (IONESCU *et al.*, 2013). Utilização de Rede Analítica Hierárquica para avaliar os custos das tecnologias alternativas para gerar eletricidade (NIXON *et al.*, 2013), tomada de decisão multicritério para avaliar benefícios, oportunidades, custos e riscos de energias alternativas (YAP; NIXON, 2015), quantificação do risco logístico de investimento em sistema de transformação de resíduos WTE (FERDAN *et al.*, 2015), trabalhos com programação estocástica para maximizar o lucro da venda de materiais reciclados (TROCHU; CHAABANE; OUHIMMOU, 2019).

Utilização de Métodos Multicritério utilizando softwares: Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS) e Viekriterijumsko Kompromisno Rangiranje (VIKOR) (AGHAJANI MIR *et al.*, 2016), TOPSIS e Método de organização de classificação preferência para avaliações de enriquecimento (PROMETHEE) I e PROMETHEE II (COBAN; ERTIS; CAVDAROGLU, 2018).

Trabalhos com foco na otimização de custos: com a utilização de rede neural artificial (RNA) utilizando algoritmo de otimização de enxame de partículas para prever quantidades de resíduos (ELSHABOURY *et al.*, 2021), trabalhos com cálculos próprios e metodologias direcionadas para minimizar o custo do sistema, utilizando equações matemáticas não lineares (MINOGLU; KOMILIS, 2013), modelo para comparar os custos de várias tecnologias de conversão de resíduos (KHAN; MARTIN, 2016). Modelo para avaliar a viabilidade dos investimentos WTE utilizando tecnologias de conversão de energia (HADIDI; OMER, 2017).

Trabalhos de otimização aplicados a sistemas específicos: com algoritmo genético multiobjetivo para utilização de resíduos para aquecimento / resfriamento urbano (ARABKOOHSAR *et al.*, 2021), Modelagem numérica em Matlab, para avaliar composição de RSU como combustível (CORIGLIANO; DE LORENZO; FRAGIACOMO, 2021), otimização e recuperação de RSU (BABALOLA *et al.*, 2021) e análise termodinâmica e econômica do ciclo de Brayton e Rankine (PAN *et al.*, 2021), e para identificar soluções de menor custo para descarte de RSU (SHAHID; HITTINGER, 2021).

Trabalhos de ciclo de vida: com programação multi-objetivo para minimizar os custos e emissões de GEE (MAVROTAS *et al.*, 2013), de análise multicritério (MILUTINOVIĆ *et al.*, 2017), utilizando algoritmos genéticos (POURREZA MOVAHED *et al.*, 2020), ou softwares comerciais como Stepwise2006 (PRATEEP NA TALANG; SIRIVITHAYAPAKORN, 2021). Otimizações dos custos de sistemas de coletas com um modelo de decisão integrado e sistema

de informação georreferenciadas SIG (ANGHINOLFI *et al.*, 2013), otimização dos custos de distâncias, viagens e tempo de coleta (KINOBE *et al.*, 2015).

Pode se observar que a maioria dos trabalhos de otimização e viabilidade de destinações focam em otimizar custos, se fazendo necessário modificações apropriadas dos modelos de sistema estrangeiro em uma metodologia caso a caso, outro fator preponderante é a escassez de dados ou variações de dados ocasionadas pela inconsistência nos sistemas operacionais de RSU em países em desenvolvimento (KHATIB, 2011).

Devido estas dificuldades o presente trabalho focou nas receitas, porque mesmo com custos discrepantes dos valores praticados, se identificando, com os valores ótimos de receita são possíveis tomar uma decisão quanto a execução dos empreendimentos, ou ainda encontrar novos valores mínimos de viabilidade, quando os custos reais forem adicionados ao algoritmo.

2.5. Região de confiança -trust-region methods

Métodos chamados de região de confiança são opções de programação não linear presente nos algoritmos de otimização, onde se determina primeiramente uma direção de decréscimo, ao longo da qual se faz uma busca unidimensional (também chamada de busca linear) com o objetivo de encontrar uma aproximação do mínimo nesta direção, os algoritmos mais usuais são do tipo Newton e Quasi-Newton (Figura 4). Em geral são baseados em modelos quadráticos. Estes algoritmos devem garantir um decréscimo suficiente do modelo quadrático na intersecção desta Região de Confiança e do conjunto viável (CHOI; KIM; CHOI, 2004).

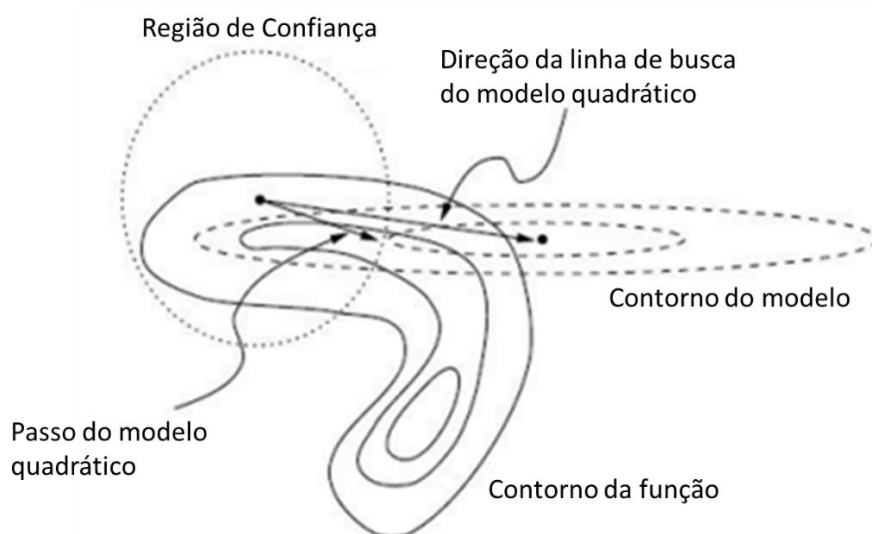


Figura 4 - Modelo esquemático do método de região de confiança

Fonte: (CHOI; KIM; CHOI, 2004) adaptada

Problemas de otimização envolvendo região de confiança, são utilizados nas mais diversas situações, desde enxame de partículas com vizinhança dinâmica (FAN; PERROS, 2014), interação de efeitos de escoamento multifásico em reservatórios (KLEMETSDAL; MØYNER; LIE, 2019), otimização do processo de clorobenzeno em escala industrial (YOSHIO; BIEGLER, 2021), reconstrução de imagens de tomografia de impedância elétrica (TAN *et al.*, 2013) e resolução de problemas combinando despacho de energia, viabilidade econômica e ambiental (MOHAMMADIAN BISHEH; RAHIMI KIAN; SEYYED ESFAHANI, 2012), apresentando-se como um método de resolução muito versátil.

Este trabalho utilizou o método trust-constr presente no Phyton por apresentar boa convergência e um baixo esforço computacional para diferentes tipos de problema (CONN; GOULD; TOINT, 2000), sendo descrito pela lógica abaixo:

$$\begin{aligned} & \min f(\mathbf{x}), \\ & \text{Sujeito a } \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \text{ e } \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}. \end{aligned}$$

Onde f é uma função escalar, \mathbf{x} é o vetor de variáveis de decisão e \mathbf{h} e \mathbf{g} são funções vetoriais, o método de ponto interior inicialmente transforma-se o problema de forma a eliminar as restrições de desigualdade, introduzindo-se uma função modificada (equação 1).

$$f_\mu(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = f(\mathbf{x}) - \mu \sum_i \log s_i \quad (1)$$

Onde $s_i, i = 1, 2, \dots, n_g$, são variáveis auxiliares, uma para cada componente da função $\mathbf{g}(\mathbf{x})$

O problema modificado torna-se então

$$\min f_\mu(\mathbf{x}, \mathbf{s})$$

Sujeito a $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ e $\mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{s} = \mathbf{0}$, $\mathbf{s} > \mathbf{0}$ e $\mu > 0$. Os termos logarítmicos são conhecidos como função barreira e desempenham um papel importante quando o problema é convexo. E as restrições agora se tornam todas do tipo igualdade.

O problema então modificado pode ser resolvido usando multiplicadores de Lagrange (CURTIS; SCHENK; ACHTER, 2010), tornando-se uma sequência de problemas de otimização restrita, onde o valor de $\mu > 0$ é progressivamente reduzido (WALTZ *et al.*, 2006). Sendo a solução do tipo iterativa (equação 2)

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \Delta \mathbf{x}_k \quad (2)$$

Onde $\Delta \mathbf{x}_k$ é o passo (ou atualização) na iteração k . Nota-se que o problema modificado também requer que se atualize o vetor auxiliar \mathbf{s} . O método então tenta fazer um passo direto, resolvendo as condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) para o problema modificado, utilizando uma

aproximação linear além do método de Newton. A tentativa é feita checando se na iteração corrente o problema é localmente convexo ou se o hessiano é positivo definido. Neste caso, o passo é calculado resolvendo o sistema (BYRD; GILBERT; NOCEDAL, 2000) (equação 3):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{0} & \mathbf{J}_h^T & \mathbf{J}_g^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}\Lambda & \mathbf{0} & -\mathbf{S} \\ \mathbf{J}_h & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_g & -\mathbf{S} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{s} \\ -\Delta \mathbf{y} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla f - \mathbf{J}_h^T \mathbf{y} - \mathbf{J}_g^T \lambda \\ \mathbf{S}\lambda - \mu \mathbf{e} \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{s} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde $\mathbf{H} = \nabla^2 f + \sum_i \lambda_i \nabla^2 \mathbf{g}_i + \sum_j y_j \nabla^2 \mathbf{h}_j$ representam o Hessiano do Lagrangiano de f_μ . \mathbf{J}_g e \mathbf{J}_h denotam os jacobianos das funções \mathbf{g} e \mathbf{h} , respectivamente. \mathbf{S} então é uma matriz diagonal, cuja diagonal são os elementos do vetor \mathbf{s} . λ é o vetor de multiplicadores de Lagrange associados as restrições \mathbf{g} . Λ também é uma matriz diagonal, cuja diagonal são os elementos do vetor λ . \mathbf{y} é vetor de multiplicadores de Lagrange associados as restrições \mathbf{h} . \mathbf{e} representa um vetor de 1's do mesmo tamanho de \mathbf{g}

Caso o passo newtoniano não seja possível, o algoritmo tenta um passo usando o método de gradiente conjugado. Este passo de gradiente conjugado tenta minimizar uma aproximação quadrática do problema restrito a uma região de confiança, sujeito a restrições (de igualdade) linearizadas, cuja forma é (equação 4) (BYRD; GILBERT; NOCEDAL, 2000).

$$\begin{cases} \min (\nabla f)^T \Delta \mathbf{x} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{x}^T (\nabla_{xx}^2 L) \Delta \mathbf{x} + \mu \mathbf{e}^T \mathbf{S}^{-1} \Delta \mathbf{s} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{s} \mathbf{S}^{-1} \Lambda \Delta \mathbf{s} \\ \text{Subject to: } \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}_g \Delta \mathbf{x} + \Delta \mathbf{s} = \mathbf{0} \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}_h \Delta \mathbf{x} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (4)$$

Neste caso, L é a função Lagrangiana (equação 5):

$$L = f(\mathbf{x}) + \sum \lambda_i g_i + \sum y_j h_j \quad (5)$$

Obviamente a cada passo bem sucedido o algoritmo checa os critérios de parada, que podem ser dos tipos: Convergência: parar se $\|\Delta \mathbf{x}_{k+1} - \Delta \mathbf{x}_k\| \leq \epsilon$, para ϵ pequeno. Número de iterações: parar se atingido. Número de chamadas da função: parar se a função f foi chamada determinado número de vezes. Este caso se aplica em situações complexas onde a função é definida através de um procedimento computacional, de modo que sua forma exata não é conhecida. Nestes casos, grandezas derivadas de f tais como o Hessiano e Jacobiano são calculados numericamente.

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA

3.1. Apresentação da metodologia

A metodologia proposta neste trabalho foi focada em elaborar um modelo para analisar a viabilidade de rotas de geração de energia para resíduos sólidos, para isso elaborou-se também um algoritmo estruturado que otimiza diferentes combinações destas destinações de resíduos sólidos, baseando-se inicialmente na cobrança de valores monetários provenientes das taxas de contribuição da população (TCP), que deverá ser cobrado da população para complementação das receitas, afim de alcançar viabilidade destes projetos dentro do horizonte máximo previsto. Entretanto este algoritmo tem a capacidade de otimizar qualquer variável de entrada, podendo ser mais de uma conforme a necessidade de quem estiver utilizando. O programa poderá servir futuramente como um simulador gratuito, para sociedade.

Inicialmente foram realizadas revisões de literatura em trabalhos acadêmicos e trabalhos de empresas especializadas nacionais, onde foram levantados valores de dados de geração de resíduos, composição de resíduos, equações de dimensionamento para plantas de geração de energia, custos e receitas. Partindo desta revisão considerou-se apenas os destinos mais consolidados e que possam ser aplicados no Brasil, sendo eles: os aterros sanitários, reciclagem, gás de aterro, digestão anaeróbia e incineração.

Foi calculada a geração de energia, os indicadores econômicos: taxa interna de retorno (TIR), para avaliar a rentabilidade mínima; tempo de retorno descontado (TRD) para garantir que a vida útil máxima das rotas fosse respeitada; Tempo de retorno simples (TRS) para verificar a discrepância entre os resultados, custo nivelado de energia elétrica (LCOE) para realizar uma comparação entre as rotas WTE sugeridas, observando sua atratividade e por fim realizada uma análise de sensibilidade do valor presente líquido (VPL) em função dos custos e receitas presentes em todas as rotas, a Figura 5 apresenta o fluxograma do trabalho.

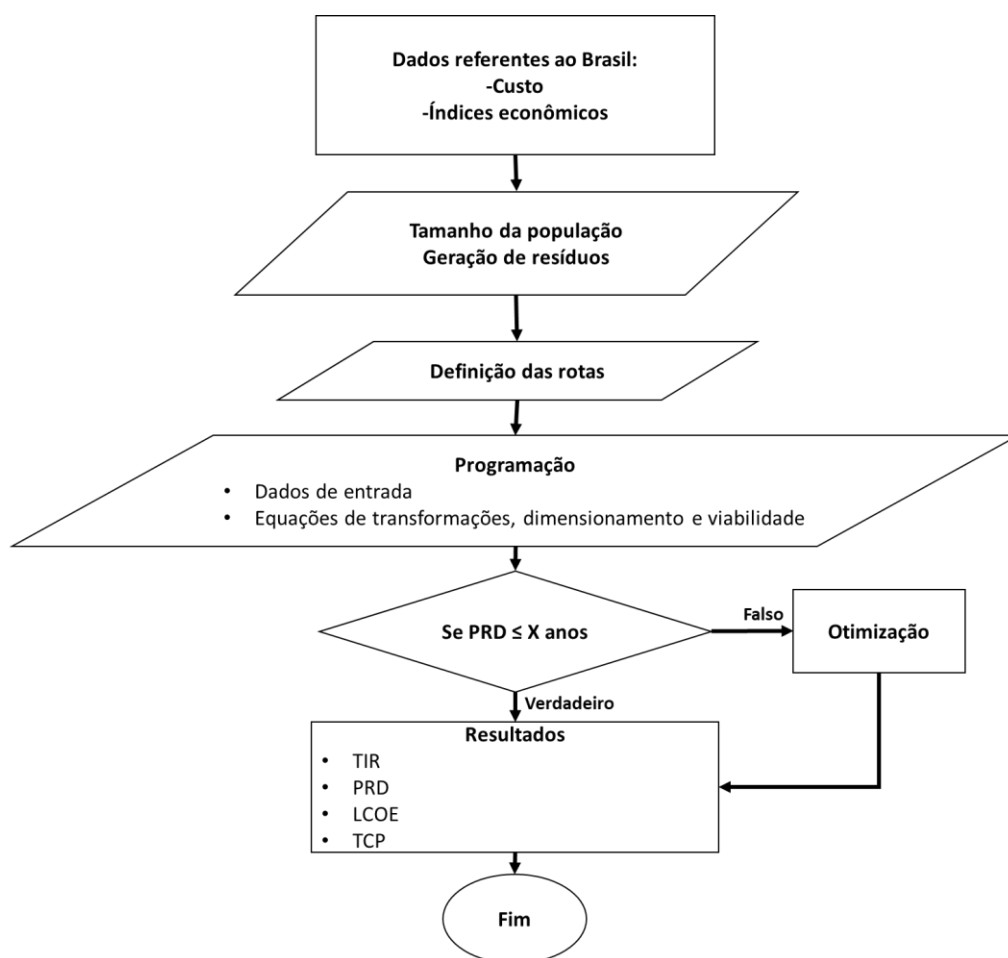


Figura 5 - Visão geral da metodologia

3.2. Geração de resíduos sólidos urbanos

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (BRASIL, 2020a) apresenta a quantidade de resíduos sólidos urbanos produzidos por habitante por dia e a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais a composição dos resíduos sólidos urbanos de maneira geral (ABRELPE, 2015), conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade e composição de RSU

	Valor	Unidade
Quantidade de resíduos produzidos por habitante	0,99	kg hab./dia
Metais	2,9	%
Papel, Papelão e TetraPak	13,1	%
Plástico	13,5	%
Vidro	2,4	%
Matéria Orgânica	51,4	%
Inertes	16,7	%

3.3. Geração de energia

Dimensionar apenas as rotas de geração de energia térmica de incineração e as de geração de biogás de digestão anaeróbia e gás de aterro.

3.3.1. Incineração

Basicamente todos os métodos de estimativa de geração de energia para resíduos sólidos urbanos passam por estimativa da geração de combustível (RSU/unidade de tempo), energia liberada pela combinação destes combustíveis que nada mais é do que seu poder calorífico inferior (PCI) e finalmente combinação de constantes de conversão, eficiências e cargas parasitas ao longo do processo, uma alternativa eficaz de calcular a quantidade de energia produzida para uma usina termoeletrica operada à Ciclo Rankine (Equação 6) (HABIBOLLAHZADE *et al.*, 2018) com qualquer tipo de combustível, poder calorífico inferior úmido do combustível e os rendimentos tanto do ciclo de geração de energia quanto da fonte geradora.

$$E_e = \dot{m}_b PCI_{(u)} * \eta_{cald} * \eta_{ciclo} \quad (6)$$

Onde: E_e = potência da planta (kJ/ano); \dot{m}_b = vazão mássica de biomassa (kg/ano); $PCI(u)$ = poder calorífico inferior Úmido (kJ/kg) (8.368 kJ/kg) (EPE, 2014); η_{cald} = eficiência da Caldeira (70%); η_{ciclo} = eficiência do ciclo (15%) (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2017).

3.3.2. Digestão anaeróbica

Apesar de ser um processo de geração de gás pela decomposição de matéria orgânica, conforme apresentado anteriormente, o processo de digestão anaeróbica não foi tratado aqui como acumulativo semelhante ao processo de gás de aterro, então optou-se pela equação 7 (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2017).

$$AD = 0,28 * \dot{m}_o * P_{CH_4} * PCI_{CH_4} * \Delta_t * CP * \eta_e \quad (7)$$

Onde: 0,28 conversão de kWh/MJ; \dot{m}_o = massa orgânica presente no RSU (t/h); P_{CH_4} = razão de geração de metano a partir da fração orgânica do RSU no Brasil (Nm³/t) (170) (EPE, 2018); PCI_{CH_4} = 35,53*106 J/m³CH₄ (PIN *et al.*, 2018); Δ_t : horas anuais de operação da planta em h/ano (8,000 h); η_e = eficiência elétrica (0,33%) (PIN *et al.*, 2018).

3.3.3. Gás de aterro

Existem uma variedade de metodologias maduras para calcular a geração de emissões provenientes de resíduos sólidos urbanos: O método mais amplamente utilizado é a cinética de primeira ordem, modelo IPCC de decaimento de primeira ordem (FOD) (ABUSHAMMALA *et al.*, 2011; IPCC, 2006; PIN *et al.*, 2018; TSAI, 2007), seguido pelo Modelo LandGEM (BARROS *et al.*, 2013; LEME *et al.*, 2014; POURREZA MOVAHED *et al.*, 2020; USEPA, 2005). Existe ainda o modelo Marticorena (EHRIG, 1983), modelo Scholl Cayon (SUN *et al.*, 2014). Esses modelos têm sido amplamente usados em todo o mundo, incluindo para aterros sanitários no Brasil (PENTEADO, *et al.*, 2015)

Entretanto características e taxas de degradação de RSU variam bastante de local para local, então os modelos de cálculo de emissão precisam considerar parâmetros diferentes. Além disso a geração e utilização dos gases pode durar um tempo relativamente longo, pesquisadores então precisam considerar projeções razoáveis para a produção futura. Ainda existem poucas pesquisas que consideraram os aspectos acima e parâmetros técnicos, o que se observa são trabalhos focados em um único projeto, o que não fornece o suficiente para planejamento e política em nível macro. (FEI *et al.*, 2019).

Para se estimar a quantidade de gás metano em aterros sanitários utilizou-se a AMS III.G (IPCC, 2006) conforme equação 8 que projeta a quantidade de metano formada durante o ano, e de posse desta estimativa estimar a potência elétrica disponibilizada (equações 9 e 10) (PIN *et al.*, 2018)

$$Q_{CH_4,y} = (\varphi * (1 - f) * GWP_{CH_4} * (1 - OX) * \frac{16}{12} * F * DOC_f * MCF * \sum_i \sum_j W_{j,x} * DOC_j * e^{-k_j * (y-x)} * (1 - e^{-k_j})) / MD \quad (8)$$

$$P_{LFG} = Q_{ch_4,y} * \eta_e * E_c * P_{cCH_4} * \left(\frac{1}{31.536.000} * \frac{1}{1000} \right) \quad (9)$$

$$E_{LFG} = P * \Delta t * CP \quad (10)$$

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

orgânico j disposto no aterro sanitário por ano x (toneladas/ano); k_j = taxa de decomposição para o tipo de corrente de resíduo j ; j = tipo de resíduo distinto entre as categorias de resíduos x ano; x = corridas a partir do primeiro ano; y = ano para o qual as são calculadas as emissões de metano; DM = densidade do metano; P_{LFG} =potência disponível para cada ano (kW); P_{CH_4} =poder calorífico do metano; E_c =eficiência de coleta de coletores de gás; E_{LFG} = energia produzida em kWh/ano; 31.536.000: número de segundos em 1 ano (s/ano); 1/1000 J/s para fator de conversão kW.

Os valores de $\phi = 0,9$; $f = 0$; $GWPC_{CH_4} = 21$; $OX = 0,0$; $F = 0,5$; $DOC_f = 0,5$; $DOC_j = 0,12$; $k_j = 0,4$ (IPCC, 2006), $MCF = 0,71$; $P_{CH_4} = 35,53,106 \text{ J/m}^3\text{CH}_4$; $DM = 0.0007168 \text{ t/m}^3$; $x = 1$ e $y = \text{ano } 5$ (PIN *et al.*, 2018), para $E_c = 35\%$ (JOHARI *et al.*, 2012).

Foi considerada para todos os cálculos de energia uma perda parasita elétrica de 10% esta perda é proveniente da conversão de energia térmica, que incluem dispositivos que consomem energia, sendo eles, bombas, ventiladores, etc, Vale ressaltar, que essas perdas apresentam um grande impacto no desempenho geral da planta, podendo perder até 15% da produção elétrica bruta (SAM, 2021).

3.4. Custos e receitas

A Tabela 3 apresenta os custos de investimento (CAPEX) e operacionais (OPEX) das destinações de RSU, considerando: (1) Reciclagem: custos com unidades de triagem, que separam RSU (orgânico, reciclável e inerte) para posterior utilização pela indústria, considerando a aquisição de terrenos, construção de galpões, unidades administrativas, armazenamento baías; (2) digestão anaeróbica: custos de pré-tratamento, digestão de resíduos, recuperação de biogás e tratamento de resíduos digeridos; (3) incineração, considerando os custos de unidade do tipo mass-Burning, similar às usinas térmicas convencionais do ciclo Rankine, considerando construção civil, forno e sistema de recuperação de energia, purificação de gases, tratamento final de resíduos, controle elétrico e sistema de monitoramento; (4) gás de aterro: considerando tratamento/compressão do gás, motor/gerador, preparação do local, equipamentos de interligação à rede; (5) aterro sanitário: custos de pré-implementação, implantação, operação, fechamento e pós-fechamento. Por fim, foram considerados os custos operacionais com serviços de coleta e limpeza urbana para cada rota.

Com base nessas referências, foram realizadas regressões lineares em função da produção anual de resíduos sólidos e feita a atualização monetária em relação à inflação, X é a quantidade

de resíduos processados, para cada destinação, entretanto para o gás de aterro, foi feita a regressão em função quantidade de resíduos processados por dia.

Tabela 3 - CAPEX e OPEX no Brasil

	CAPEX	OPEX	Unidadet
Limpeza urbana (BRASIL, 2020a)	-	137,73	R\$/hab./ano
Aterro sanitário(GRS-UFPE, 2014)	$8,0765 * X + 628179$	$9,5504 * X + 484804$	USD\$
Gás de aterro (EPE, 2018)	$9824 * X^{-0,473}$	$704,15 * X^{-0,473}$	USD\$/t/dia
Reciclagem (PAES <i>et al.</i> , 2020)	$11,593 * X^{-0,196}$	130	USD\$/t
Digestão anaeróbia(GRS-UFPE, 2014)	$2,125 * X^{1,1781}$	$67,666 * X^{-0,153}$	USD\$ e
Incineração(GRS-UFPE, 2014)	$273,67 * X + 5E07$	$-2E-05 * X + 31,656$	USD\$ e
			USD\$/t

Assumiu-se que a fase de projeto e construção deveria durar até três anos (alocados no ano 0), os anos restantes foram estimados de acordo com a duração da tecnologia de destino após o ano 0.foi admitido o período máximo de 15 anos para rota com gás de aterro, pois segundo Pin *et al.* (2018) a partir do quinto ano se consegue utilizar aproximadamente 88,3% de todo o gás produzido ao longo da vida útil do aterro e aumentar consideravelmente a potência instalada das máquinas, e de 20 anos para as demais rotas Luz *et al.* (2015) e Di T *et al.* (2019).

As receitas presentes na Tabela 4 com valores médios de comercialização de recicláveis como vidro, papel, metal, plástico e composto, foram coletados com dados da Associação Compromisso Empresarial para a Reciclagem do Brasil, da venda de energia junto a agencia nacional de energia elétrica e da compensação de créditos de energia com a distribuidora de energia, para todas as conversões do trabalho foi considerada uma taxa de câmbio de 5.5 (US\$) com base na média ao longo de 2021.

Tabela 4 - Receitas dos produtos comercializados no Brasil

	Valor cobrado	Unidade
Plástico (CEMPRE, 2020a)	1168	R\$/T
Vidro (CEMPRE, 2020a)	85	R\$/T
Metal (CEMPRE, 2020a)	2348	R\$/T
Papel (CEMPRE, 2020a)	568	R\$/T
Composto (CEMPRE, 2020b)	100	R\$/T
Eletricidade (ANEEL, 2019)- (EQUATORIAL, 2022)	0,29 – 0,766	R\$/kWh

3.5. Indicadores financeiros

Foram utilizados como indicadores financeiros: valor presente líquido, taxa interna de retorno, tempo de retorno descontado e o custo nivelado de eletricidade.

3.5.1. Taxa Interna de Retorno

A taxa interna de retorno é calculada quando o valor presente líquido (VPL) é igual a zero (equação 11), no entanto, esses valores não podem ser encontrados analiticamente, necessitando de abordagens de tentativa e erro. Felizmente, a maioria dos softwares de programação possuem uma função TIR automatizada que pode ser utilizada.

$$0 = \text{VPL} = \sum_{t=1}^n \frac{\text{VFL}}{(1+\text{TIR})^t} = I \quad (11)$$

Onde: VPL = valor presente líquido; TIR = taxa interna de retorno; t = período de ocorrência do evento; I = Investimento n = número total de períodos (horizonte do projeto).

3.5.2. Tempo de retorno

O tempo de retorno é a ferramenta utilizada para calcular quanto tempo o empreendimento demora para recuperar o capital investido, quando atrelado a ele está a taxa de desconto, nos valores futuros do fluxo de caixa (equação 12) ele é denominado tempo de retorno descontado (TRD), quando não tempo de retorno simples (TRS). (NETO, 2009), esta taxa de desconto é expressa em percentual e exige muita cautela e estudo, de maneira genérica, pode ser considerada como a soma dos custos de remuneração do capital, custo de oportunidade, riscos, e inflação, Damodaran (2019) atribuiu o valor de 11,61% para o caso do Brasil.

$$\text{PRD} = \frac{\text{FCA}}{\text{FCD}} \quad (12)$$

Onde: TRD= tempo de retorno descontado; FCA = fluxo de caixa acumulado; FCD = fluxo de caixa descontado.

3.5.3. Custo nivelado de eletricidade

O custo nivelado de eletricidade (LCOE) é uma metodologia que permite comparar o custo da eletricidade de diferentes tecnologias de conversão com diferentes capacidades com base nos custos unitários de eletricidade (kWh) durante a vida operacional da instalação. (MABALANE *et al.*, 2021), é calculada usando a equação 13 (HADIDI; OMER, 2017):

$$\text{LCOE} = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{(\text{OPEX}_t + L_t)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{(E_t)}{(1+r)^t}} \quad (13)$$

Onde: Et: quantidade de energia elétrica gerada durante o ano t (MWh); I₀: Investimento total no ano 0; OPEX_t: custos de operação e manutenção durante o ano t; L_t: custos residuais durante o ano t; r: taxa de desconto.

3.6. Algoritmo de otimização

A programação foi realizada em linguagem Python por ser uma linguagem Open-Source de propósito geral usado para data science, machine learning, automação de scripts entre outros. O fluxograma de programação (detalhado no Apêndice II), sendo estruturado em 4 blocos de código para rodar o programa, denominados: Bibliotecas, para carregar as base de dados utilizadas no programa; programação, onde se elaborou a lógica do programa introduzindo os dados e todas as equações e considerações do algoritmo; foi elaborada também uma condição, em função do tempo de retorno descontado (TRD), sendo ela satisfeita, apresentam-se os resultados, são eles taxa interna de retorno (TIR), tempo de retorno descontado, custo nivelado de eletricidade e taxa de contribuição da população; caso esta condição não seja satisfeita, utiliza-se o script de otimização com o método da região de confiança, e os novos resultados satisfazendo esta condição serão apresentados.

3.6.1. Bibliotecas

Para facilitar a compilação, no primeiro bloco de código se fez necessária a importação de bibliotecas com base de dados, sendo carregada a base de dados de finanças com o comando: “!pip install git+https://github.com /numpy/numpy-financial”, e indicados dentro desta base quais as funções que seriam importadas e as ferramentas que seriam utilizadas, sendo elas: “exp” para calcular potências, “sum” para realizar somas de variáveis, “cumsum” para calcular a soma cumulativa dos elementos em um determinado eixo de uma matriz, “zeros” para uma nova matriz de forma e tipo fornecidos, com zeros, “concatenate” para concatenar múltiplas matrizes em um eixo especificado e “irr” para o cálculo da TIR .

3.6.2. Dados de entrada

Foi introduzida uma função denominada de cenário, com o comando: def Cenario(introdução de todos os argumentos da função e finalizado com):, a Tabela 5 apresenta todos os argumentos da função cenário. Estes argumentos são introduzidos com o nome do argumento sem espaços, o sinal de igual, o valor numérico do argumento finalizado com uma vírgula. Foram introduzidos 46 argumentos, divididos em 11 argumentos de geração de resíduos, referentes a quantidade diária de percentuais das categorias produzidas ou combinações das mesmas, 20 referentes as informações para geração de energia, tais como funcionamento das plantas percentuais de eficiência, valores energéticos dos combustíveis,

fatores de degradação dos resíduos orgânicos; 15 argumentos referentes aos custos de implantação, operação, valores referentes as receitas e valores de taxas tanto para custos quanto para receita, população período e ano, vale ressaltar aqui que qualquer um dos argumentos de entrada podem ser otimizados conforme a necessidade do usuário.

Tabela 5 - Argumentos de função.

Dados de entrada	Nome do Argumento
Quantidade de resíduos produzidos por habitante	ML
Percentual Plástico	PPlast
Percentual Vidro	PVidro
Percentual Metal	PMetal
Percentual Pape	PPap
Percentual Orgânico	POrg
Percentual Outros	POut
Percentual Reciclável	PRec
Percentual Incineração	PInc
Percentual Aterro	PAterro
Poder calorifico inferior incineração	PCIInc
Horas Anuais Funcionamento	HAF
Eficiência da Caldeira	ECic
Eficiência do ciclo	ECald
Cargas Parasitas	PCParas
Fator Correção Modelo	FCIM
Fração Metano Capturada	FMCQ
Potencial Aquecimento Global Metano	PAGM
Fator Oxidação	OX
Fração CH ₄	FCH ₄
DOCf	DOCf
Fator Correção Metano	FCM
DOCj	DOCj
Taxa Decomposição Resíduos Orgânicos	TDRO
Densidade Metano	DM
Volume especifico Gás(EPE, 2018)	PGas
Eficiência Coleta Gases	ECG
Poder calorifico inferior CH ₄	PCIMet
Ano Obtenção Créditos	AOC
Ano Emissões Metano	AEM
Eficiência motor	Emot
Taxa Desconto Custo	TDCusto
Taxa Desconto Receita	TDReceita
OPEX coleta urbana	COord
OPEX Recilcagem	COREC

Dados de entrada	Nome do Argumento
Receita Reciclagem Plástico	VRPlastico
Receita Reciclagem Vidro	VRVidro
Receita Reciclagem Metais	VRMetais
Receita Reciclagem Papel	VRPapel
Receita Composto	VRComposto
Receita Geração Eletricidade	GE
Taxa de Contribuição da População	TCP
Cotação Dolar	CD
População	POP
Período Default	PeriodoDefault
Ano	Ano

3.6.3. Equações de transformações, dimensionamento e viabilidade

Após introduzidos os argumentos a próxima etapa foi a inserção das equações de transformação, foram elaboradas 24 equações: sendo 12 de transformação, para melhor explorar o cenário de geração de resíduos, por dia mês ano e hora (equações 14 a 25); 2 equações de dimensionamento e 9 equações e conversão de custos de instalação e operação, sendo que se forem atribuídos valores as equações, as mesmas devem ser realocadas a função de dados de entrada como argumentos.

$$mbTonDia = ML * POP/1000 \quad (14)$$

$$mbTonHora = mbTonDia/24 \quad (15)$$

$$mbTonAno = mbTonDia * 364.25 \quad (16)$$

$$mbPlasticoAno = mbTonAno * PPlast/100 \quad (17)$$

$$mbVidroAno = mbTonAno * PVid/100 \quad (18)$$

$$mbMetalAno = mbTonAno * PMet/100 \quad (19)$$

$$mbPapelAno = mbTonAno * PPap/100 \quad (20)$$

$$mbReciclavelAno = mbTonAno * PRec/100 \quad (21)$$

$$mbOrganico = mbTonAno * POrg/100 \quad (22)$$

$$mbIncHora = mbTonHora * PInc/100 \quad (23)$$

$$mbADHora = mbTonHora * POrg/100 \quad (24)$$

$$mbAterro = mbTonAno * PAterro/100 \quad (25)$$

Onde: mbTonDia= quantidade de RSU toneladas por dia; mbTonHora= quantidade de RSU toneladas por hora; mbTonAno= quantidade de RSU toneladas por ano; mbPlasticoAno= quantidade de plástico gerada em toneladas por ano; mbVidroAno= quantidade de vidro gerado em toneladas por ano; mbMetalAno= quantidade de metais gerados em toneladas por ano;

mbPapelAno= quantidade de papel gerado em toneladas por ano; mbReciclavelAno= quantidade de materiais recicláveis gerados em toneladas por ano; mbOrganico= quantidade de material orgânico gerado em toneladas por ano; mbIncHora= quantidade de material disponível para incineração em toneladas por hora; mbADHora= quantidade de material disponível para digestão anaeróbia em toneladas por hora; mbAterro= quantidade de material disponível para ser enviado para aterro sanitário em toneladas por ano.

Para calcular a energia produzida para o processo de incineração considerando o Ciclo Rankine (Equação 26).

$$\text{PotDispInc} = (\text{mbIncHora} * \text{PCIInc} * \text{ECald}/100 * \text{ECic}/100) * (1 - \frac{\text{PCParas}}{100}) \quad (26)$$

Onde: PotDispInc=Potencia elétrica disponibilizada pelo processo de incineração (kW/h).

Para o processo de digestão anaeróbica optou-se pela equação 27 (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2017)

$$\text{PotDispAD} = (0.28 * \text{mbOrganico} * \text{PGas} * \text{Emot} * (1 - \frac{\text{PCIMet}}{1000000})) / (364.25 * 24) * (1 - \frac{\text{PCParas}}{100}) \quad (27)$$

Onde: PotDispAD=Potencia elétrica disponibilizada pelo processo de digestão anaeróbica (kW/h)

Sabe-se que a geração de e energia pode variar bastante em função do poder calorífico do combustível, e da quantidade de gás disponibilizado para este fim, ou mesmo para geração de calor, contudo o algoritmo não faz distinção destas informações, se o usuário ajustar estas equações e atribuir ao programa novos argumentos na função def cenário, os mesmos poderão ser otimizados.

As equações 28-36 apresentam os custos de investimento (CAPEX) e operação (OPEX), todas as conversões do trabalho foram feitas considerando uma taxa de câmbio de 5,5 (US\$), sendo este o valor médio do dólar ao longo do ano de 2022, vale destacar neste ponto, que foram realizadas regressões lineares para obtenção das curvas com os custos para análise do comportamento ao longo das populações, entretanto se os mesmos forem alocados como argumentos da função os mesmos também poderão ser otimizados no programa:

$$\text{CIAS} = 8.0765 * \text{mbAterro} + 628179 \quad (28)$$

$$\text{CIBA} = 9824 * (\text{mbTonDia} * 170)^{-0.473} \quad (29)$$

$$\text{CIREC} = 11.593 * \text{mbReciclavelTonAno}^{0.196} \quad (30)$$

$$\text{CIDA} = 2.125 * (\text{mbDAHora} * \text{HAF})^{1.1781} \quad (31)$$

$$\text{CIINC} = 273.67 * (\text{mbIncHora} * \text{HAF}) + 50000000 \quad (32)$$

$$\text{COAS} = 9.5504 * \text{mbAterro} + 484804 \quad (33)$$

$$\text{COBA} = \text{CIBA} * 0.17 \quad (34)$$

$$\text{CODA} = 67.666 * (\text{mbDAHora} * \text{HAF})^{0.153} \quad (35)$$

$$\text{COINC} = -2\text{E} - 05 * (\text{mbIncHora} * \text{HAF}) + 31.656 \quad (36)$$

Onde: CIAS= custo de investimento aterro (US\$); CIBA= custo de investimento do gás de aterro (US\$/ton); CIBA= custo de investimento da reciclagem (US\$/ton); CIDA= custo de investimento Digestão Anaeróbia (US\$); CIINC= custo de investimento Incineração (US\$); COAS= custo de operação aterro (US\$) COBA= custo de operação gás de aterro (US\$/ton) CODA= custo de operação digestão anaeróbia (US\$/ton); COINC= custo de operação Incineração (US\$/ton)

Para o fluxo de caixa foram elaboradas 3 matrizes, sendo 2 de 11 por 21, uma com 11 custos de instalação (equação 37) outra com os 11 custos de operação (equação 38) e uma de 10 por 21, com 10 fontes receitas estimadas (equação 39), sendo em algumas das linhas da matriz atribuído o valor zero para posterior implementação se necessário, o 21 das matrizes representam os anos de operação do fluxo de caixa sendo a primeira coluna custos de implantação e 20 anos de operação, na matriz de instalação apenas a coluna 1 tem valores, os demais são vazias, já as matrizes de operação e receitas possuem a primeira coluna vazia e as demais preenchidas, as equações abaixo apresentam este equacionamento. Foram criadas três matrizes de zeros, tanto para os custos de investimento quanto de operação e para as receitas (equações 40 - 61).

$$\text{CustosInvestimento} = \text{zeros}((11,22)) \quad (37)$$

$$\text{CustosOperacionais} = \text{zeros}((11,22)) \quad (38)$$

$$\text{Receitas} = \text{zeros}((10,22)) \quad (39)$$

$$\text{CustosInvestimento}[1,0] = \text{CIAS} \quad (40)$$

$$\text{CustosInvestimento}[2,0] = \text{CIBA} * \text{mbTonDia} * 107.1 \quad (41)$$

$$\text{CustosInvestimento}[3,0] = \text{mbReciclavelAno} * \text{CIREC} \quad (42)$$

$$\text{CustosInvestimento}[4,0] = \text{CIAD} \quad (43)$$

$$\text{CustosInvestimento}[5,0] = \text{CIInc} \quad (44)$$

$$\text{CustosInvestimento}[6,0] = \text{CAPEXTransp} \quad (45)$$

$$\text{CustosOperacionais}[0,1:] = \text{POP} * \text{COord}/\text{CD} \quad (46)$$

$$\text{CustosOperacionais}[1,1:] = \text{COAS} \quad (47)$$

$$\text{CustosOperacionais}[2,1:] = (\text{CIBA} * \text{mbTonDia} * 107.1) * 0.17 \quad (48)$$

$$\text{CustosOperacionais}[3,1:] = \text{OPEXTransp} \quad (49)$$

$$\text{CustosOperacionais}[4,1:] = \text{mbReciclavelTonAno} * \text{COREC} \quad (50)$$

$$\text{CustosOperacionais}[5,1:] = (\text{mbDAHora} * \text{HAF}) * \text{CODA} \quad (51)$$

$$\text{CustosOperacionais}[6,1:] = (\text{mbIncHora} * \text{HAF}) * \text{COINC} \quad (52)$$

$$\text{Receitas}[0,1:] = \text{TCP} * \text{mbTonAno} \quad (53)$$

$$\text{Receitas}[1,1:] = \left(\frac{\text{VRPlastico}}{\text{CD}}\right) * \text{mbPlasticoAno} \quad (54)$$

$$\text{Receitas}[2,1:] = \left(\frac{\text{VRVidro}}{\text{CD}}\right) * \text{mbVidroAno} \quad (55)$$

$$\text{Receitas}[3,1:] = \left(\frac{\text{VRMetais}}{\text{CD}}\right) * \text{mbMetalAno} \quad (56)$$

$$\text{Receitas}[4,1:] = \left(\frac{\text{VRPapel}}{\text{CD}}\right) * \text{mbPapelAno} \quad (57)$$

$$\text{Receitas}[5,1:] = \left(\frac{\text{Composto}}{\text{CD}}\right) * (\text{mbOrganico} * 0.3) \quad (58)$$

$$\text{Receitas}[6,1:] = \text{GE/CD} * \text{HAF} * \text{PotDispAD} \quad (59)$$

$$\text{Receitas}[6,1:] = \text{GE/CD} * \text{HAF} * \text{PotDispInc} \quad (60)$$

$$\begin{aligned} \text{Receitas}[7,1:] = & \text{EMot} * ((((((\text{FCIM} * (1 - \text{FMCQ}) * \text{PAGM} * (1 - \text{OX}) * 16/12 * \text{FCH4} * \\ & \text{DOCf} * \text{FCM} * \text{mbOrganico} * \text{DOCj} * \exp(-\text{TDRO} * (\text{AOC} - \text{AEM})) * (1 - \exp(-\text{TDRO}))) / \\ & \text{DM})) * \text{PCIMet}/31536000000) * (\text{ECG}/100) * ((1 - \text{PCParas})/100))) * \text{GE/CD} * \text{HAF} \end{aligned} \quad (61)$$

Foram elaboradas ainda 11 equações para resolução do fluxo de caixa (equações 62-72), são elas: 1 para concatenar as matrizes de custos, 2 de somatórios de custos e receitas, 2 para VPL de custos e receitas, 2 para o fluxo de caixa e fluxo de caixa descontados, 2 para o VPL do fluxo de caixa e VPL do fluxo de caixa descontado, 1 de VPL 1 de TIR.

$$\text{Custos} = \text{np.concatenate}((\text{CustosInvestimento}, \text{CustosOperacionais}), \text{axis} = 0) \quad (62)$$

$$\text{TotalCustos} = \text{sum}(\text{Custos}, \text{axis} = 0) \quad (63)$$

$$\text{TotalReceitas} = \text{sum}(\text{Receitas}, \text{axis} = 0) \quad (64)$$

$$\text{VPLCustos} = \text{np.divide}(\text{TotalCustos}, (1 + \text{TDCusto})^{\text{Ano}}) \quad (65)$$

$$\text{VPLReceitas} = \text{np.divide}(\text{TotalReceitas}, (1 + \text{TDReceita})^{\text{Ano}}) \quad (66)$$

$$\text{FluxoDeCaixa} = \text{TotalReceitas} - \text{TotalCustos} \quad (67)$$

$$\text{FluxoDeCaixaDescontado} = \text{cumsum}(\text{FluxoDeCaixa}) \quad (68)$$

$$\text{VPLFluxoDeCaixa} = \text{VPLReceitas} - \text{VPLCustos} \quad (69)$$

$$\text{VPLFluxoDeCaixaDescontado} = \text{cumsum}(\text{VPLFluxoDeCaixa}) \quad (70)$$

$$\text{VPL} = \text{sum}(\text{FluxoDeCaixa}) \quad (71)$$

$$TIR = irr(\text{FluxoDeCaixa}) \quad (72)$$

Para o cálculo do tempo de retorno descontado se fez necessária a utilização da função “if” para identificar os saldos positivos e negativos dentro dos fluxos de caixa (equações 73 e 74)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{PeriodoVPL} = \text{PeriodoDefault} \\ \text{UltimoSaldoNegativoVPL} = \max(\text{VPLFluxoDeCaixaDescontado}) \\ \text{PrimeiroSaldoPositivoVPL} = 1e - 6 \\ \text{If any}(\text{VPLFluxoDeCaixaDescontado} > 0): \\ i = \text{np.nonzero}(\text{VPLFluxoDeCaixaDescontado} > 0)[0][0] \\ \text{PeriodoVPL} = \text{Ano}[i - 1] - 1 \\ \text{UltimoSaldoNegativoVPL} = \text{VPLFluxoDeCaixaDescontado}[i - 2] \\ \text{PrimeiroSaldoPositivoVPL} = \text{VPLFluxoDeCaixaDescontado}[i - 1] \end{array} \right. \quad (73)$$

$$\text{PaybackDescontado} = \text{PeriodoVPL} + \text{abs}(\text{UltimoSaldoNegativoVPL}) / (-\text{UltimoSaldoNegativoVPL} + \text{PrimeiroSaldoPositivoVPL}) \quad (74)$$

Na terceira célula foram implementadas as saídas do programa, sendo elas: LOCE, TempodeRetornoDescontado, taxa de contribuição da população e TIR da função cenário.

Para o calculo do LCOE foram elaboradas 3 equações para estimar as gerações de energia anuais (equações 75 a 77)

$$\text{POTANOINC} = \text{HAF} * \text{PotDispAD} \quad (75)$$

$$\text{POTANODA} = \text{HAF} * \text{PotDispInc} \quad (76)$$

$$\text{POTANOLFG} = \text{EMot} * ((((((\text{FCIM} * (1 - \text{FMCQ}) * \text{PAGM} * (1 - \text{OX}) * 16/12 * \text{FCH4} * \text{DOCf} * \text{FCM} * \text{mbOrganico} * \text{DOCj} * \exp(-\text{TDR0} * (\text{AOC} - \text{AEM})) * (1 - \exp(-\text{TDR0})))))) / \text{DM})) * \text{PCIMet}/31536000000) * (\text{ECG}/100) * ((1 - \text{PCParas})/100))) * \text{HAF} \quad (77)$$

E duas equações para a o fator de recuperação de capital e para o LCOE (equações 78 e 79)

$$\text{CRF} = \text{TDCusto} * (1 + \text{TDCusto})^{(20)} / (1 + \text{TDCusto})^{((20)-1)} \quad (78)$$

$$\text{LCOE} = \frac{(\text{TotalCustosI} * \text{CRF} + \text{TotalCustosO})}{(\text{POTANOINC} + \text{POTANOLFG} + \text{POTANODA})} \quad (79)$$

3.6.4. Otimização

Na quarta célula (Figura 6) foi elaborado o script de otimização, sendo necessário importar o pacote de otimização denominado “scipy.optimize” que se trata de uma outra biblioteca com rotinas aplicadas a ciências, estatísticas, processamento determinísticos. Foram importadas as ferramentas: minimize; BFGS, que é um algoritmo de Minimização de função

escalar de uma ou mais variáveis; SR1, que é uma estratégia de atualização, utilizado na primeira iteração a matriz Hessiana ou sua inversa; Bounds, Restrição de limites nas variáveis; NonlinearConstraint, utilizada para restrição não linear nas variáveis, para operar a função trust-constr.

```

0.8632844361996896

from scipy.optimize import minimize, BFGS, SR1
from scipy.optimize import Bounds, NonlinearConstraint
import numpy as np

def CenarioRestrito(x):
    pb,pbb,vpl,tir = Cenario(TaxaDeposicao=x, TaxaDescontoCusto=x[1])
    return pb

def custo(x):
    return x**2

metodo = 'trust-constr'
g = NonlinearConstraint(CenarioRestrito,5,
b = Bounds(0,1500)

#metodo = 'SLSQP'
#metodo = 'COBYLA'
#b = [(0,1000)] # Precisa do [] e d
#g = ({'type': 'ineq', 'fun': lambda x: 7
PeriodoDefault=100. POP=100000.0. Ano=no.linspace(0. 21. 22). C0transporte=0.26. COE=7.25. COBA=3.

sol = minimize(custo,(150.),method=metodo,bounds=b,constraints=g,options=opt)
print(sol)
print(CenarioRestrito(sol.x))

/usr/local/lib/python3.7/dist-packages/scipy/optimize/_hessian_update_strategy.py:187: UserWarning: delta_grad == 0.0. Check if the approximated function
approximations.', UserWarning)
barrier_parameter: 2.0480000000000001e-09
barrier_tolerance: 2.0480000000000001e-09
cg_niter: 300
cg_stop_cond: 2
constr: [array([7.00000017]), array([298.58747955])]
constr_nfev: [732, 0]
constr_nhev: [0, 0]
constr_nhev: [0, 0]

```

Figura 6 - Visualização do script de otimização

Foram definidas duas funções, a primeira função criada foi denominada de Cenário restrito com o comando: “def CenarioRestrito(x):”, calculando como variáveis de saída o TRD ou a TIR, o x da função são os argumentos de decisão, que podem ser quantos se julgarem necessários por quem está analisando, sendo que estes argumentos podem ser qualquer valor presente na função “def Cenario”, bastando apenas escrever o comando: “variáveis de saída = nome da função(nome do argumento a ser otimizada=x[n])”, foi considerado o argumento TCP tendo como retorno a TIR e TRD. A segunda função foi denominada de custo, tendo como retorno o valor minimizado a X².

O próximo passo foi a utilização do método de resolução, conforme já mencionado o trust-constr, sendo definidas as restrições do método, segundo os limites da função “ $a \leq g(x) \leq b$ ”, no Python as restrições são introduzidas na forma de objetos com o comando: “g = NonlinearConstraint(função a ser utilizada,valor inferior, valor superior)”, podendo ser neste caso o TRD, o segundo objeto é referente a variável que se quer minimizar, foi considerada TCP, no comando “b = Bounds(valores mínimos(-15000), valores máximos (15000))”.

Também foi indicado um número de interações para o programa, aferindo aleatoriamente 1.000 interações, a solução do problema foi chamada com os comandos: “sol = minimize(custo,(6600.),method = metodo, bounds = b, constraints = g, options=opt); print(sol) e print (CenarioRestrito (sol.x)), o valor 6600 indica um “chute” inicial para resolução do problema.

Desta forma pode se ler o programa: “minimizar a taxa de deposição ao quadrado sujeito um tempo de retorno igual a 20, com uma taxa de deposição variando entre -15000 a 15000 R\$.”

CAPÍTULO 4 VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA PARA PEQUENOS MUNICÍPIOS DO PARÁ

Este teve por objetivo analisar a viabilidade de implantação de destinações Waste-to-Energy considerando municípios de até 250.000 habitantes, que representam cerca de 98% dos municípios brasileiros (BRASIL, 2020a), considerações e resultados do estudo serão apresentados a seguir.

Foram elaboradas 6 combinações rotas de destinações de RSU baseadas em diferentes combinações de tecnologia, considerando como indicador financeiro o tempo de retorno descontado no período máximo de 15 anos para rota com gás de aterro, esse valor foi escolhido para dimensionar a usina de geração de energia, pois segundo Pin *et al.* (2018) esta consideração chega a utilizar 88,3% de todo o gás produzido ao longo da vida útil do aterro e aumentar consideravelmente a potência instalada das máquinas, e de 20 anos para as demais rotas (LUZ *et al.*, 2015) e (DI TRAPANI *et al.*, 2019).

Foi verificada se a potência instalada não ultrapassaria o limite de 5 MW (DOU, 2022) para utilização de crédito de energia junto a concessionária de energia elétrica, como indicadores econômicos utilizou-se: taxa interna de retorno; período de retorno descontado; Tempo de retorno simples; custo nivelado de energia elétrica; valor presente líquido. Foram realizadas duas análises, considerando a venda de energia por meio de Leilão de energia elétrica, e com o sistema de créditos de energia.

4.1. Rotas tecnológicas

As rotas tecnológicas de destinação de RSU utilizadas foram: aterros, para resíduos que ainda não podem ser aproveitados; reciclagem para resíduos denominados “secos” no Brasil; digestão anaeróbica/gás de aterro/digestato para matéria orgânica, sendo o digestato um resíduo do processo de digestão anaeróbia, muito semelhante ao insumo produzido pelo processo de compostagem e que pode ser comercializado como fertilizante; incineração que pode utilizar tanto resíduos orgânicos, alguns recicláveis e combustíveis sólidos a partir de inertes. As 6 rotas de destinações de RSU descritas na Figura 7 e que serão detalhadas a seguir, em todos os trajetos foram considerados os custos de coleta urbana (CU).

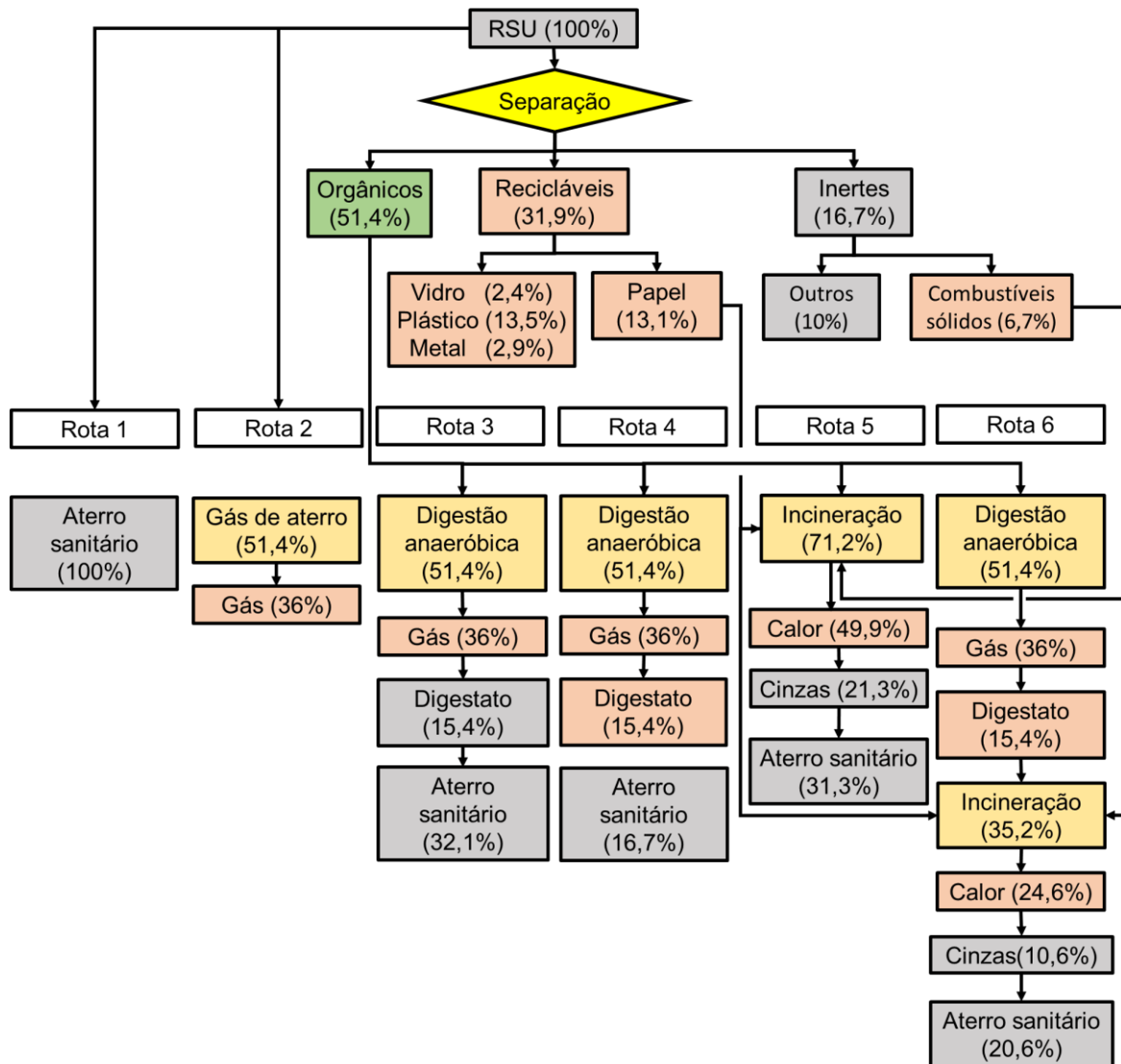


Figura 7 - Rotas tecnológicas

4.1.1. Rota 1 – Aterro sanitário

Esta rota foi estudada no intuito de servir de referência para as tecnologias WTE na recuperação de RSU no Brasil, admitindo que todos os resíduos coletados serão encaminhados ao aterro sanitário (100% RSU)

4.1.2. Rota 2 – Aterro sanitário e gás de aterro

Nesta rota apresentada na Figura 8, todos os resíduos são coletados sem separação (100% RSU), e apenas matéria orgânica (51,4%) é utilizada como gás para geração de energia (36% da massa RSU), foi admitida uma redução de 70% por massa de orgânicos (WWF-BRASIL, 2015), a matéria inorgânica remanescente (48,6%) é composta de materiais recicláveis e inertes não serão utilizadas.

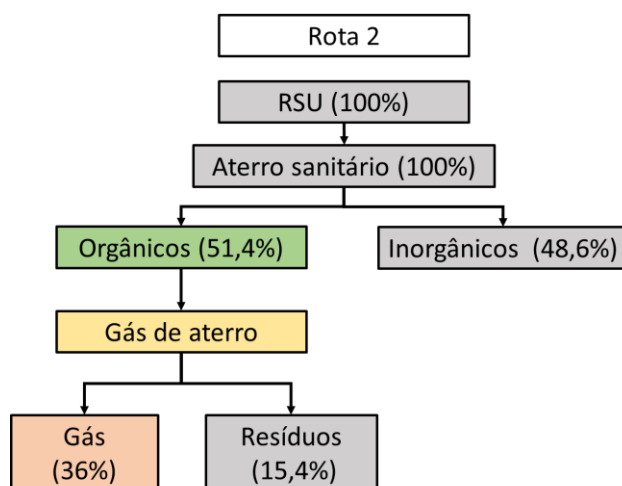


Figura 8 - Aterro com gás de aterro

4.1.3. Rota 3 – Reciclagem, digestão anaeróbica e aterro sanitário

Separação entre orgânicos e inorgânicos apresentados na Figura 9, sendo os orgânicos (51,4%) encaminhados para o processo de digestão anaeróbica, utilizados como gás (36% da massa de RSU), recicláveis (31,9%) separados e materiais não utilizados (15,4% de rejeitos AD e 16,7% de materiais inertes) enviados para aterros, totalizando 32,1% dos RSU.

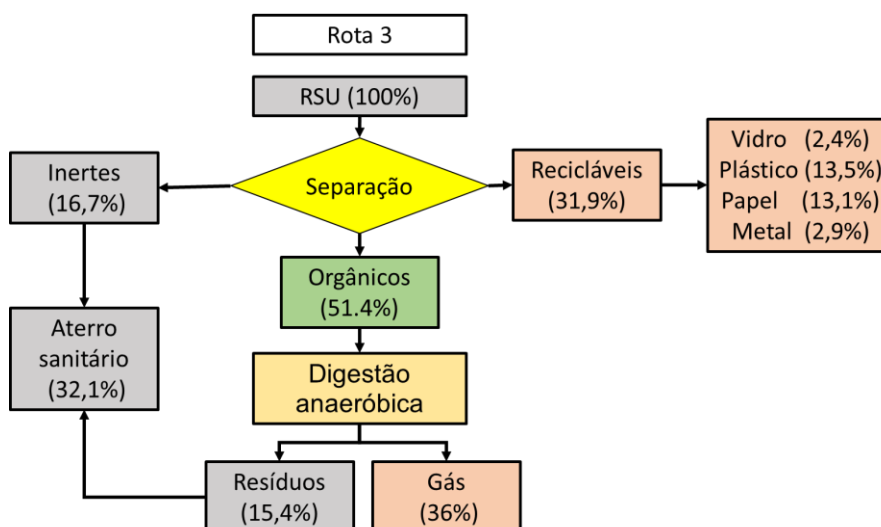


Figura 9 - Reciclagem, digestão anaeróbica e aterro sanitário

4.1.4. Rota 4 - Reciclagem, digestão anaeróbica com venda de digestato e aterro sanitário

As mesmas considerações da Rota 2 foram feitas, assumindo que os resíduos dos digestores anaeróbicos (15,4% do RSU) serão vendidos como fertilizante com o mesmo valor do composto no mercado brasileiro, enviando apenas a massa inerte para aterro (16,7 %) mostrado na Figura 10.

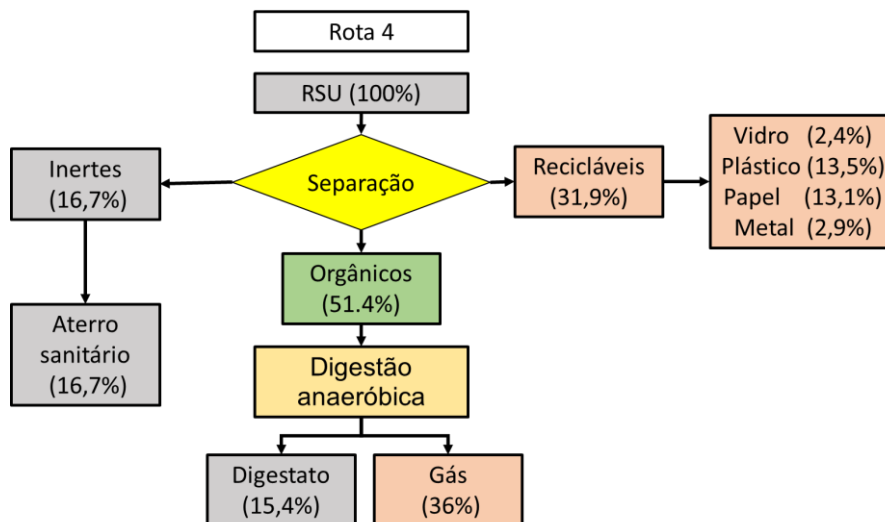


Figura 10 - Reciclagem com digestão anaeróbica, venda de digestato e aterro sanitário

4.1.5. Rota 5 – Reciclagem, incineração e aterro sanitário

Separação entre orgânicos e inorgânicos (Figura 11), considerando o orgânico (51,4%) como combustível, 6,7% da massa inerte que poderia de alguma forma ser utilizada como combustível sólido, segundo Luz *et al.* (2015), os inerte possuem resíduo de madeira e quintal, têxtil, borracha, espuma e couro chegando a 9,8% da massa, também foi admitido como combustível o resíduo de papel (13,1%), todos com foco no aumento do poder calorífico, totalizando 71,2% da massa de RSU para incineração com rendimento de 30% (LOMBARDI; CARNEVALE, 2018) no processo, transformando 49,9 % da massa de combustível em calor, o reciclável separado (18,8%), e o material não utilizado (10% de inertes e 21,3% de cinzas) enviados para o aterro, totalizando 31,4% da massa de RSU.

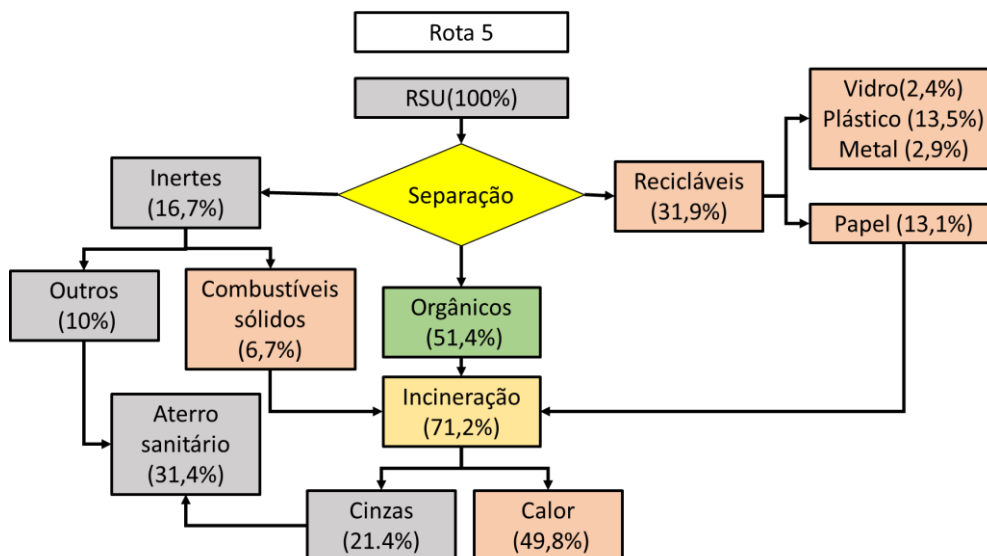


Figura 11 - Reciclagem com incineração e aterro sanitário

4.1.6. Rota 6 – Reciclagem, digestão anaeróbica, incineração e aterro sanitário

Para a última Rota, foi considerada a separação entre orgânicos e inorgânicos, os orgânicos utilizados no processo de digestão anaeróbica (51,4% da massa de RSU) para geração de gás (36%), os rejeitos encaminhados para incineração, também com 6,7% da massa de inertes e resíduos de papel (13,1%), totalizando 35,2% para incineração, transformando 24,6% da massa de RSU em calor, o reciclável separado (18,8%), o material não utilizado (10% inertes e 10,6% cinzas) enviado para aterro sanitário (20,6%) mostrado na Figura 12.

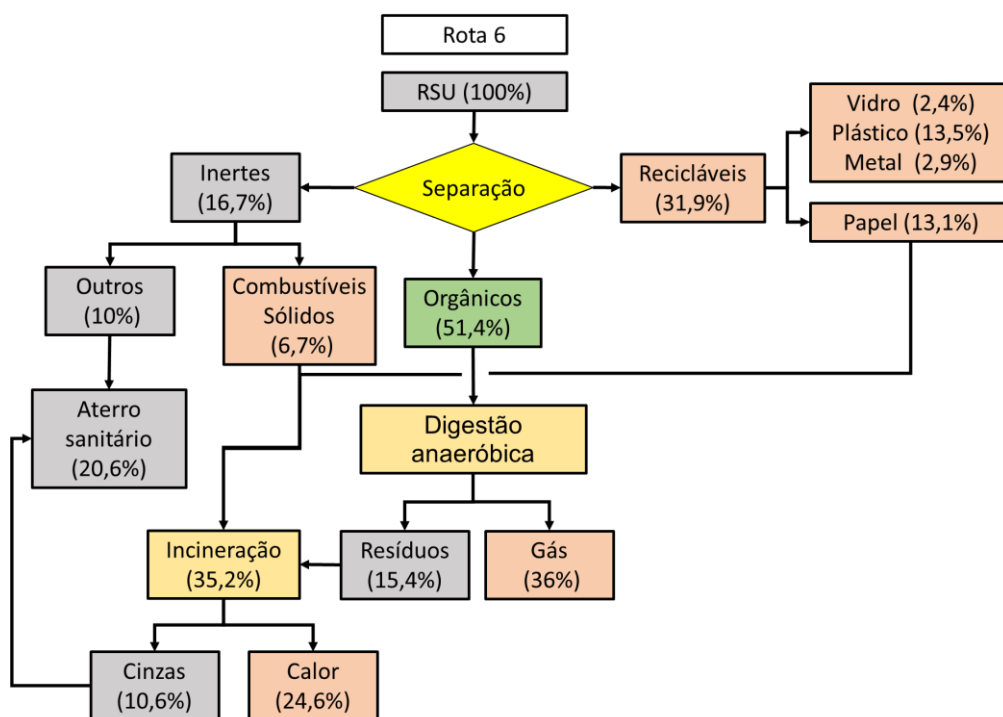


Figura 12 - Reciclagem com digestão anaeróbica, incineração e aterro sanitário

4.2. Resultados

Serão apresentados a geração de energia Figura 13, custo nivelado de eletricidade (LOCE), gasto anual estimado com pagamento de taxa de cobrança da população (TCP), valor de TCP cobrado dos habitantes por mês, tempo de retorno descontado (TRD), taxa interna de retorno (TIR), considerando o valor de venda de energia, e junto a concessionária no sistema de créditos, por fim será apresentada uma análise de sensibilidade das rotas considerando o impacto dos componentes de custo e receitas em função do valor presente líquido (VPL).

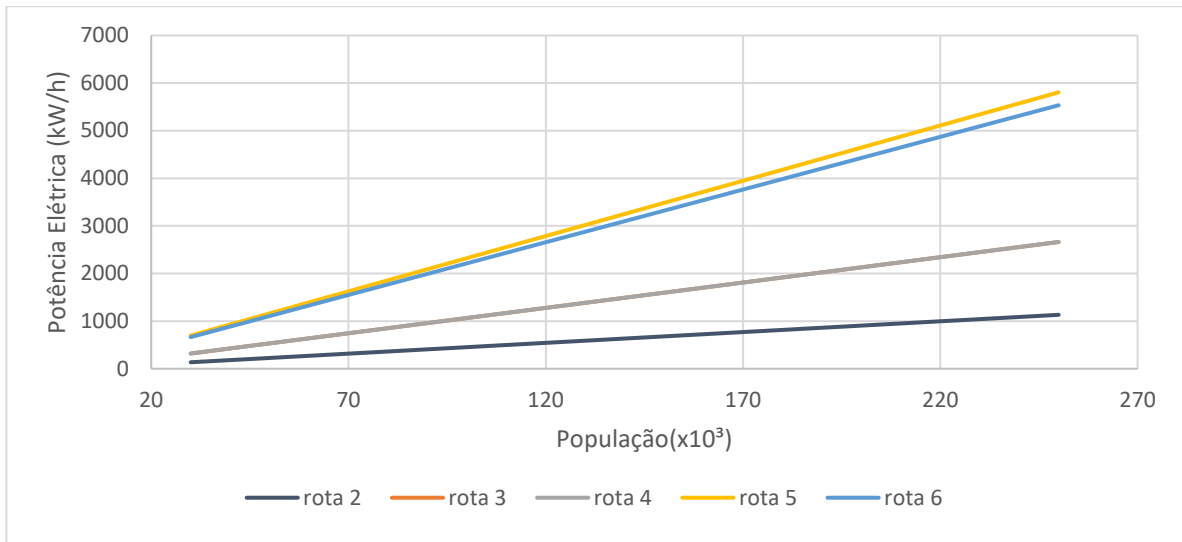


Figura 13 - Potência elétrica por rota

Nesta análise, a rota 5 que utiliza incineração como geração de energia se destacou com o maior potencial de geração, iniciando em 690 kW, principalmente pelo fato de incinerar mais de 70% do resíduo municipal, a rota 6 de incineração e digestão anaeróbica ficou em seguida com geração mínima estimada de 660 kW, apesar de tratar a mesma quantidade de resíduos por duas fontes diferentes, seu potencial de geração é levemente inferior, devido ao processo de geração anaeróbica, que gera menos energia, os valores chegaram a 5MW em populações de 215 mil habitantes, podendo se enquadrar no modelo de crédito de energia brasileiro.

As rotas 3 e 4 com a mesma quantidade de energia gerada pela digestão anaeróbica iniciando em 320 kW, a rota 2 o gás de aterro apresentou menor geração por população (135 kWh), sendo a solução menos interessante em termos de planejamento energético, vale ressaltar que existe no mercado tecnologia para construir usinas térmicas com essas capacidades.

Os valores estimados de LCOE presentes na Figura 14 apresentaram pouca variação em relação a faixa populacional estudada, neste gráfico em que a rota 2 teve o menor valor de R\$/kW, sendo agora a rota mais interessante, isso se deve aos custos de operação dos aterros sanitários e sistema de geração de energia em relação a outras tecnologias.

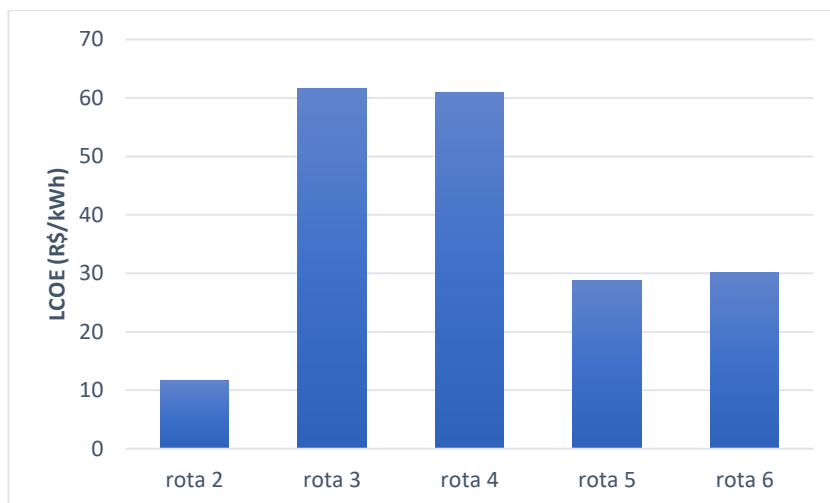


Figura 14 - LCOE

Zia *et al.* (2020) afirmam que o tamanho do processamento dos destinos envolvidos influencia diretamente em seu CAPEX e OPEX, o que pode ser visto na Figura 14 entre as rotas 3 e 4, onde se observa esta diferença, devido ao aterro menor na rota 4, uma vez que se assumiu que todo digestato seria vendido como fertilizante, daí a rota 3 ser menos atraente, além disso, pelos cálculos utilizados, a digestão anaeróbica gera menos energia por tonelada do que a incineração, necessitando de uma tarifa de energia maior.

Com relação as rotas 5 e 6 onde apesar de ambas possuírem o maior percentual de massa de RSU destinada para geração de energia, seus valores de CAPEX e OPEX acabam se equivalendo em relação a seu potencial de geração deixando seu LCOE extremamente próximo.

4.2.1. TCP considerando o valor da venda de energia elétrica

A Figura 15 apresenta o gasto anual estimado com TCP e o custo mensal pela população considerando o valor da venda de energia elétrica.

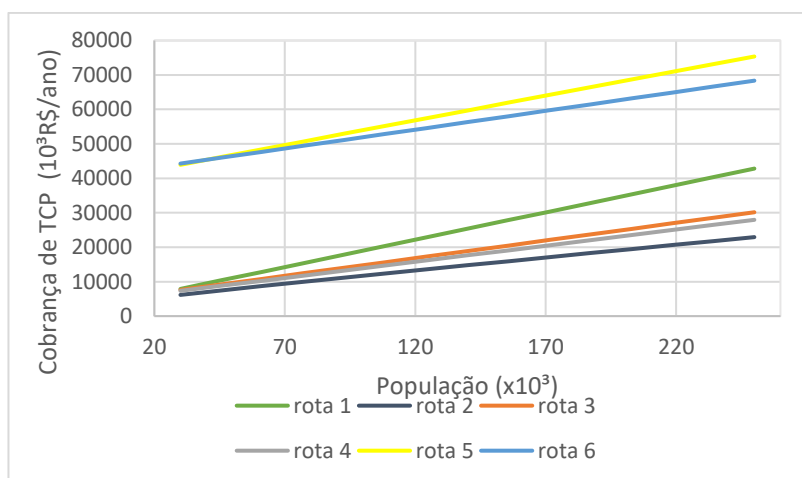


Figura 15 - Gastos estimados com TCP considerando venda de energia elétrica

O gasto anual das rotas variou entre 6,1 e 75,4 milhões R\$/ ano, sendo menos interessantes as rotas 5 (incineração, reciclagem e aterro sanitário) e 6 (incineração, digestão anaeróbica, reciclagem e aterro sanitário) com valores entre 44 e 75,4 milhões R\$/ ano, a rota 1 (aterro sanitário) que possui como única fonte de renda da rota a cobrança de TCP, apresentou valores superiores as rotas 4, 3 e 2, com valores entre 6 e 30 milhões US\$/ ano. Este gráfico demonstra o que a implementação de tecnologias WTE nas destinações de RSU podem impactar positivamente (ROTHENBERGER *et al.*, 2006; ZHAO *et al.*, 2016), diminuindo as despesas com a gestão de RSU, agora verificando mesmo em pequenas escalas.

O valor do TCP por rota por mês é apresentado na Figura 16, conforme demonstrado anteriormente, a rota 2 teve a menor taxa de contribuição para a população, confirmando com os valores do LCOE, com um valor máximo de 17,11 R\$/ mês, as rotas 5 e 6 apresentaram os maiores valores entre 22,28 e 122,99 R\$/mês. As rotas 3 e 4 apresentaram valores inferiores a rota 1 com valores entre 9,32 e 21,13 R\$/mês, contrariando o resultado de LOCE, provavelmente por este indicativo estimar seus valores, levando em consideração como fonte de renda apenas a geração de energia por custos totais, sem considerar as receitas provenientes da venda dos recicláveis e composto.

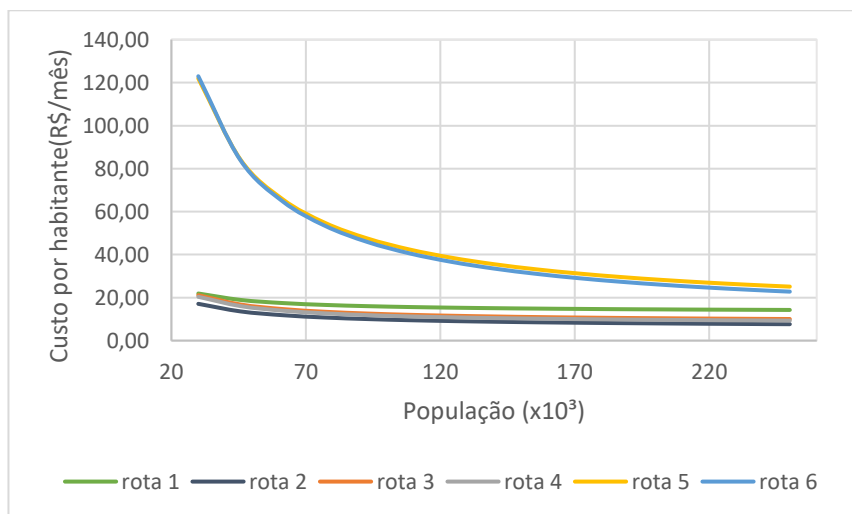


Figura 16 - Custo mensal por habitante considerando a venda de energia elétrica

O custo mensal máximo por habitante foi de 122,99 R\$ para rota 5, pior WTE analisada, um valor alto se comparado com as outras rotas, representando cerca de 10% do salário mínimo brasileiro valor elevado para renda média da população, impraticável para municípios brasileiros, já a rota 3 com valor inferior mais próximo da rota 1 apresentou valor máximo de 21,13 que representa 1,8% do salário mínimo brasileiro, e praticamente o mesmo valor estimado para tratar os resíduos sólidos urbanos no mesmo município.

Todo o tempo de retorno descontado das rotas se manteve constante em 20 anos e o tempo de retorno simples em 9 anos, com a taxa interna de retorno em aproximadamente 11,61%, com exceção da rota 2 que apresentou variação tanto de TRD com valores menores que 15 anos e TRS em 8 anos, com TIR de 11,61 %.

4.2.2. Considerando comercialização de crédito de energia

A Figura 17 apresenta o gasto anual estimado com TCP pela população, agora considerando o sistema de créditos junto a concessionária de energia.

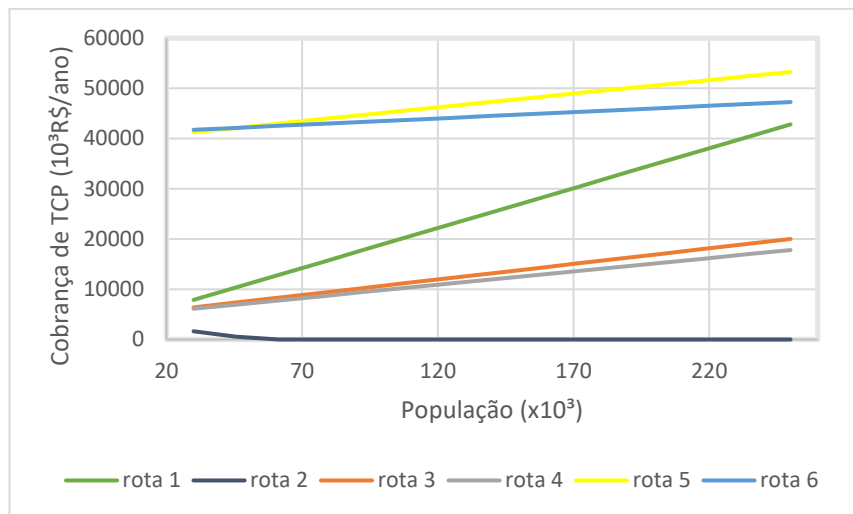


Figura 17 - Gastos estimados com TCP considerando créditos de energia

O gasto anual das rotas variou entre 1,6 e 53,25 milhões R\$/ ano, se mantendo menos interessantes as rotas 5 de incineração, reciclagem e aterro e 6 de incineração, digestão anaeróbica, reciclagem e aterro com valores entre 41,26 e 53,25 milhões R\$/ ano, as rotas 4, 3 e 2 apresentaram valores inferiores a rota 1, com valores entre 0,56 e 20 milhões R\$/ ano.

O valor do TCP por rota por mês é apresentado na Figura 18, a rota 2 teve a menor contribuição dos contribuintes, com um valor máximo de 4,55 R\$/ mês, entretanto as rotas 5 e 6 apresentaram os maiores valores entre 16,67 e 115,97 R\$/mês. As rotas 3 e 4 apresentaram valores entre 17,02 e 6,77 R\$/mês.

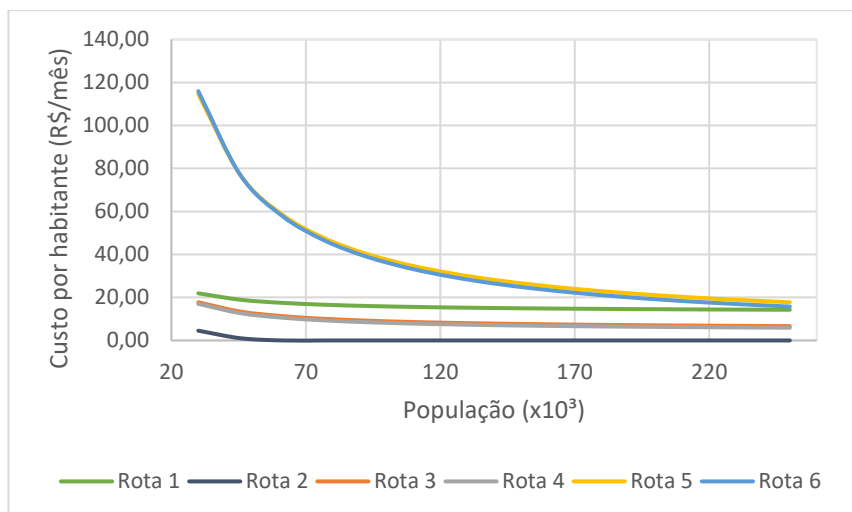


Figura 18 - Custo mensal por habitante considerando créditos de energia

O custo mensal máximo por habitante foi de 115,97 R\$ para rota 6, pior WTE analisada, representam cerca de 9,57% do salário mínimo, a rota 3 rota com valor máximo de R\$ 17,75 que representando 1,46% e a rota 2 com valor máximo de R\$ 4,55 que representa 0,38% do salário mínimo brasileiro, sendo a mais atrativa para investimentos com foco na população.

Todo o tempo de retorno descontado das rotas se manteve constante em 20 anos e o tempo de retorno simples em 9 anos, com a taxa interna de retorno em aproximadamente 11,61%, com exceção da rota 2 que desta vez apresentou variação tanto de TRD com valores menores que 15 anos e TIR (Figuras 19 e 20), com dispensa de cobrança de TCP para populações acima de 55.000 habitantes.

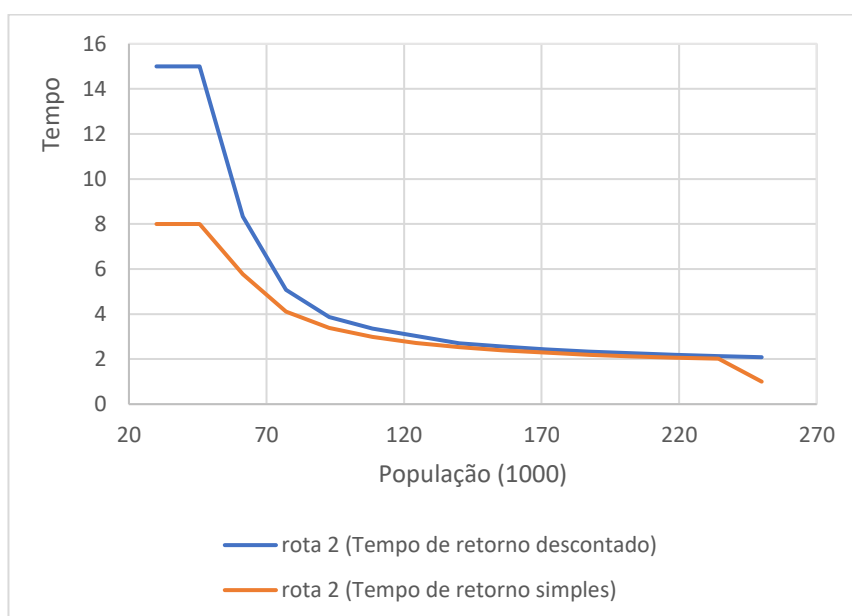


Figura 19 – Tempo de retorno para a rota 2

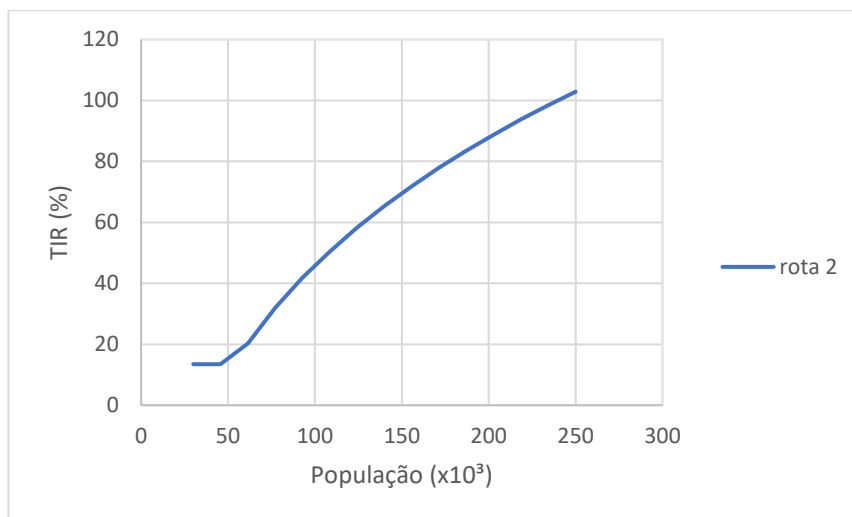


Figura 20 - Taxa interna de retorno para rota 2

Observa-se que o tempo de retorno descontado cai consideravelmente quando ocorre a ausência de cobrança de TCP, se mantendo quase constante a partir de 200 mil habitantes, e o TRS apresenta uma diferença considerável até 150 mil habitantes, voltando a cair quando a população ultrapassa os 220 mil habitantes. Já a taxa interna de retorno se mantém progressiva a partir da ausência de cobrança de TCP, podendo chegar a mais de 100% de ganhos para cidades de 250 mil habitantes ao longo dos 15 anos de operação.

4.2.3 Análise de sensibilidade

Realizou-se uma análise de sensibilidade identificando o impacto do CAPEX, OPEX e das receitas em função do VPL, as Figuras 21 a 26 mostram este impacto.

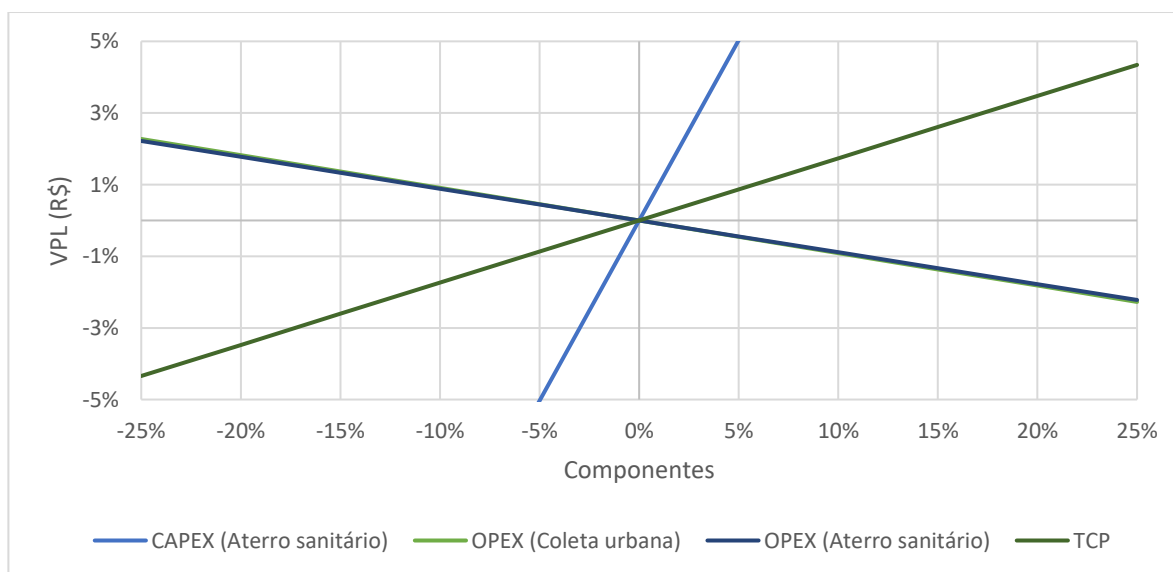


Figura 21 - Análise de sensibilidade da rota 1 em função do VPL

Na rota 1, observou-se que o custo de instalação é o componente que apresenta o maior impacto, nos custos da rota, seguido pelo valor de cobrança de TCP, muito provavelmente por ser a única fonte de receita da rota, os custos operacionais e com serviços de limpeza apresentaram pouca influência.

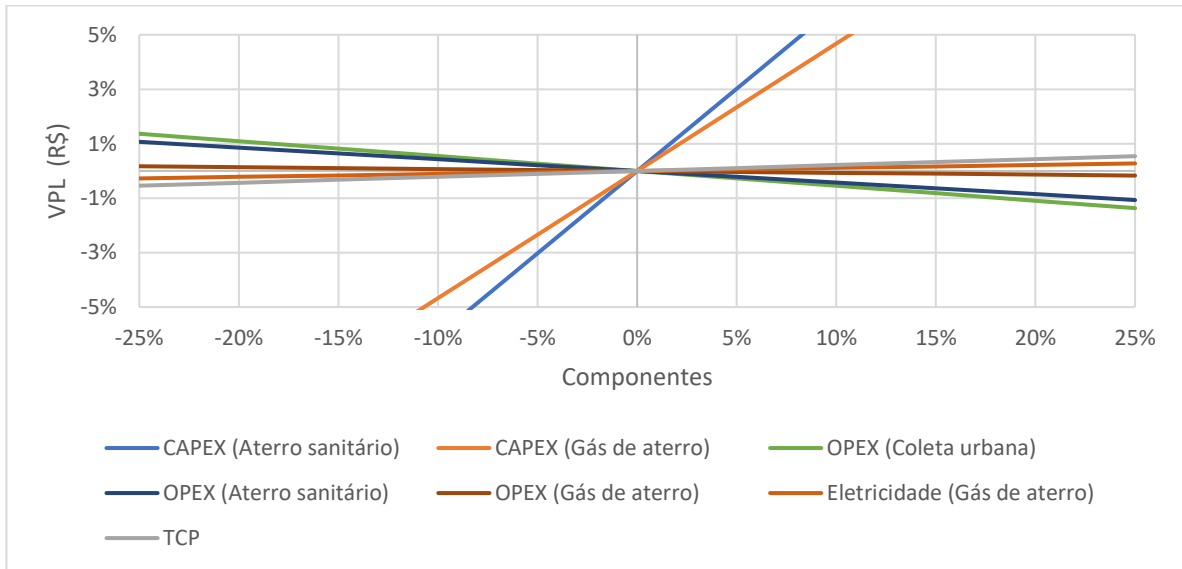


Figura 22 - Análise de sensibilidade da rota 2 em função do VPL

Na rota 2, os custos de investimento do aterro e do sistema de gás de aterro apresentaram o maior impacto, seguidos dos serviços relacionados a limpeza urbana, custos operacionais com o aterro e cobrança com TCP, a venda de energia e os custos operacionais com o sistema de gás tem pouca influência na VPL.

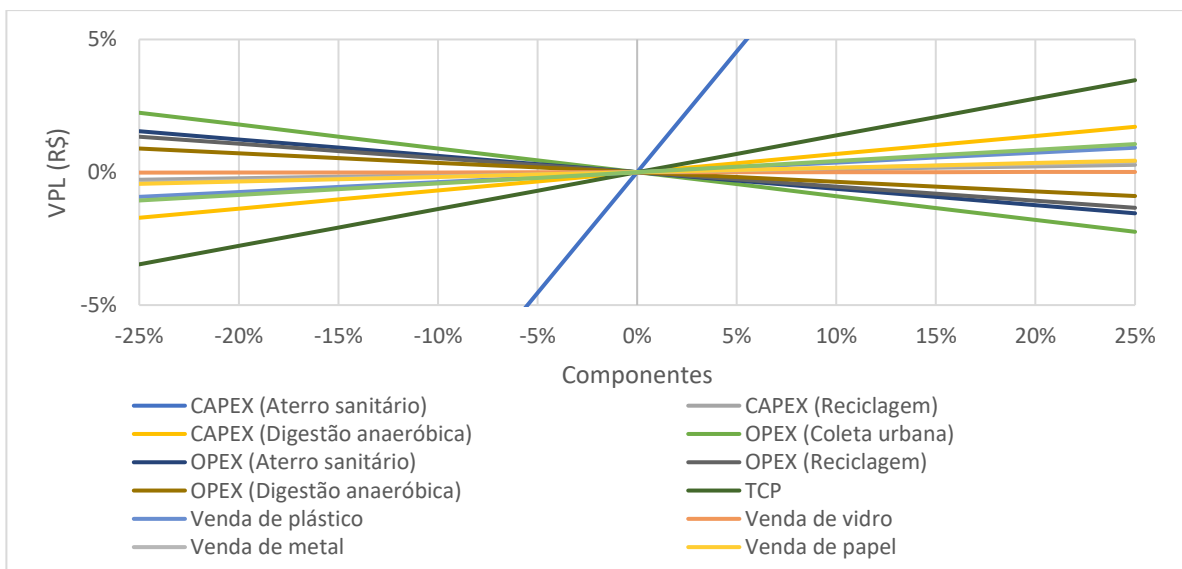


Figura 23 - Análise de sensibilidade da rota 3 em função do VPL

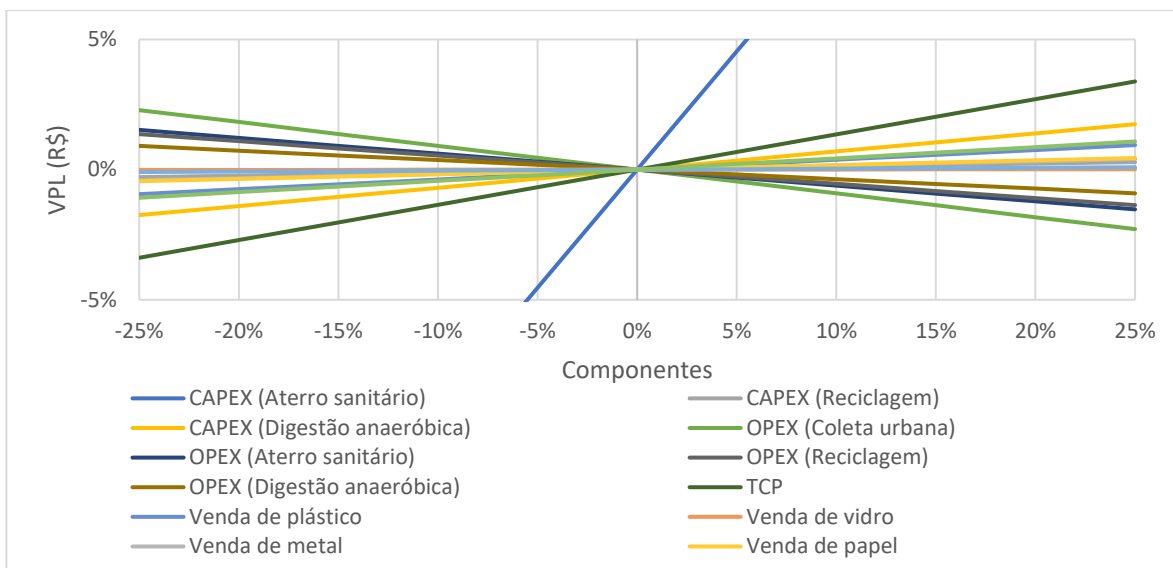


Figura 24 - Análise de sensibilidade da rota 4 em função do VPL

Para as rotas 3 e 4 os custos de investimento com o aterro sanitário que apresentam a maior influência, seguidos pelo valor de cobrança do TCP, serviços de limpeza urbana, custos de operação do aterro sanitário, instalação do sistema de digestão anaeróbica, com menor influência os custos operacionais com reciclagem, sistema de digestão anaeróbica e venda de materiais plásticos, a receitas proveniente com a venda de vidro metal e papel e do composto apresentam pouca influência no VPL

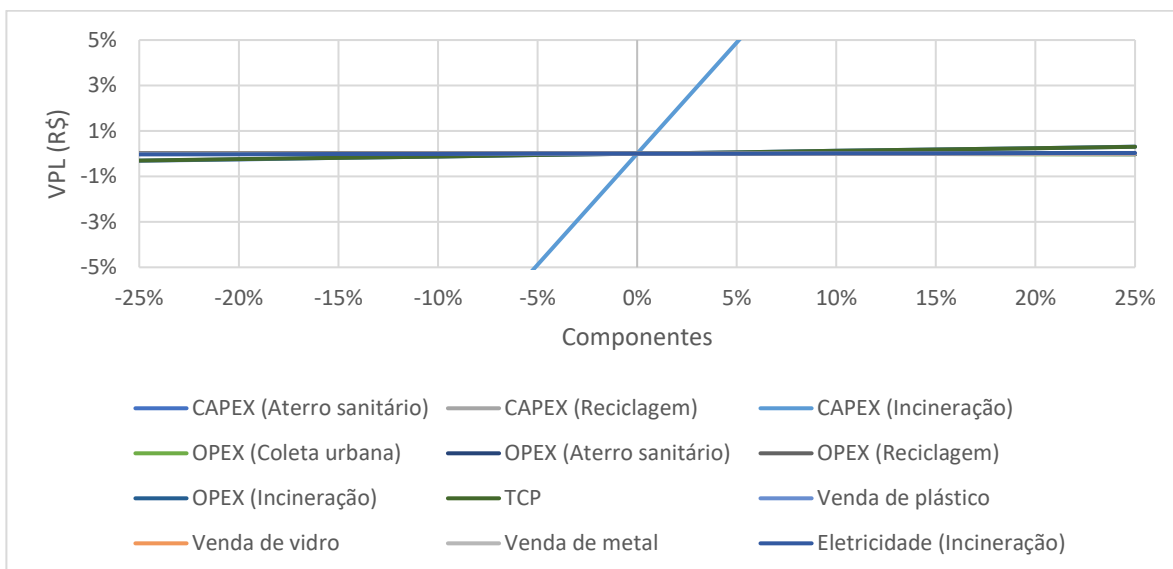


Figura 25 - Análise de sensibilidade da rota 5 em função do VPL

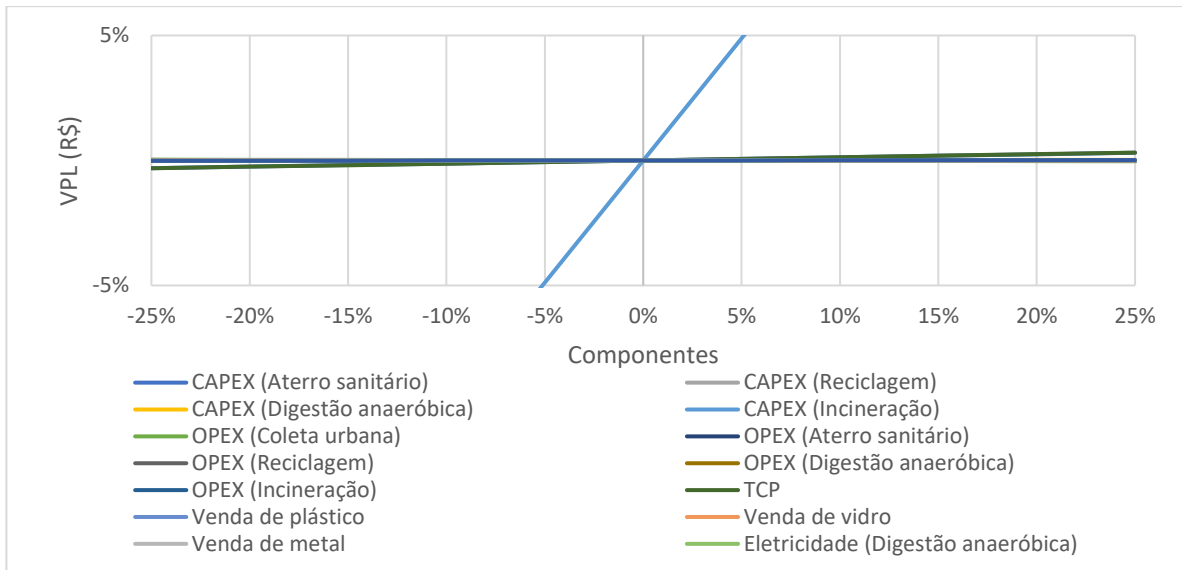


Figura 26 - Análise de sensibilidade da rota 6 em função do VPL

Para as rotas 5 e 6, observou-se que o custo com investimento do sistema de geração de energia é tão destoante dos custos das tecnologias das demais destinações finais, que apenas ele aparenta ter influência no VPL.

4.3. Discussão

Comparando o que já foi apresentado até aqui e apesar de necessitar ocupar grandes espaços territoriais, a rota 2 apresentou os melhores resultados, pensando nas perspectivas para a população brasileira, esta rota é a mais indicada para destinações de RSU em pequena escala no Brasil, desde que sejam feitas as considerações de Pin *et al.* (2018) e Souza *et al.* (2019), de se dimensionar um projeto com potência instalada a partir do quinto ano da geração de gases.

Quanto a quantidade de resíduos disponibilizados para o aterro e cobrança de TCP, a rota 4 apresentou o segundo menor aterro estimado, revelando-se também atrativa do ponto de vista econômico, com custos de TCP inferiores ao uso de aterro sanitário somente, sendo muito encorajada por autores como (ROTHENBERGER *et al.*, 2006; COLVERO *et al.*, 2020), devendo se atentar somente para venda do digestato, onde a mesma deve ser precedida de um mercado de composto (FERNANDO, 2019), não sendo uma barreira para municípios menores e próximo de áreas rurais, caso não se consiga vender o digestato, a rota 3 também pode ser uma opção já que também obteve valores com a cobrança de TCP inferior ao do aterro (rota 1).

Do ponto de vista econômico as rotas 5 e 6, que utilizam incineração para geração de energia, apresentaram valores extremamente elevados, sendo necessário algum tipo de

complementação ou utilização de incentivos governamentais caso esta seja a opção de fazer as rotas de energia (ALZATE; RESTREPO-CUESTAS; JARAMILLO-DUQUE, 2019), e sendo consideradas menos atrativos para municípios de pequeno porte, entretanto ser for pensando em arranjos com o intuito de se agrupar municípios menores com grandes contingentes populacionais.

Luz *et al.* (2015) apresenta em seu trabalho a composição dos resíduos sólidos urbanos da população em função do grau de desenvolvimento do país, onde é possível verificar a composição de resíduo em função da renda, e verificar que quanto menor a renda, maior é a produção de orgânicos e maior é a quantidade de umidade presente, interferindo na quantidade energia disponibilizada, em função da produção de gases e calor para incineração.

Por fim, conforme apresentado, é notório o potencial de geração de resíduos em energia como uma opção para gestão de resíduos sólidos (BAJIC *et al.*, 2015; KALYANI & PANDEY, 2014), e todos concordam que a geração térmica é uma destinação final factível de recuperação de energia, sob a forma de calor ou utilizando eletricidade, ou combustível (ZHAO *et al.*, 2016).

CAPÍTULO 5 AGRUPAMENTO DE MUNICÍPIOS DO ESTADO DO PARÁ

Este capítulo teve por objetivo o agrupamento de municípios paraenses, com o foco em diminuir custos de instalação e operação para resolver o passivo dos resíduos sólidos urbanos no estado do Pará, foi utilizado como referência o plano regional de resíduos sólidos do estado do Pará de 2012. Documento que surgiu da necessidade de avaliar as vantagens e eventuais desvantagens da regionalização de gestão de resíduos sólidos no Estado do Pará, documento que propõe soluções envolvendo operação, gerenciamento e gestão regionalizada, logística de resíduos sólidos urbanos, com isso buscando minimizar investimentos, custos operacionais gerando ganhos de economias de escala nos aspectos de gerenciamento, implantação, infraestrutura e operação, esforços integrandos, planejamento e gestão compartilhada com planos intermunicipais (BRENCORP, 2012). O documento utiliza a subdivisão de doze Regiões de Integração (RI), através do decreto estadual no. 1.066 de 2008 para efeito de formulação e implementação de políticas públicas multi setoriais, Figura 27.

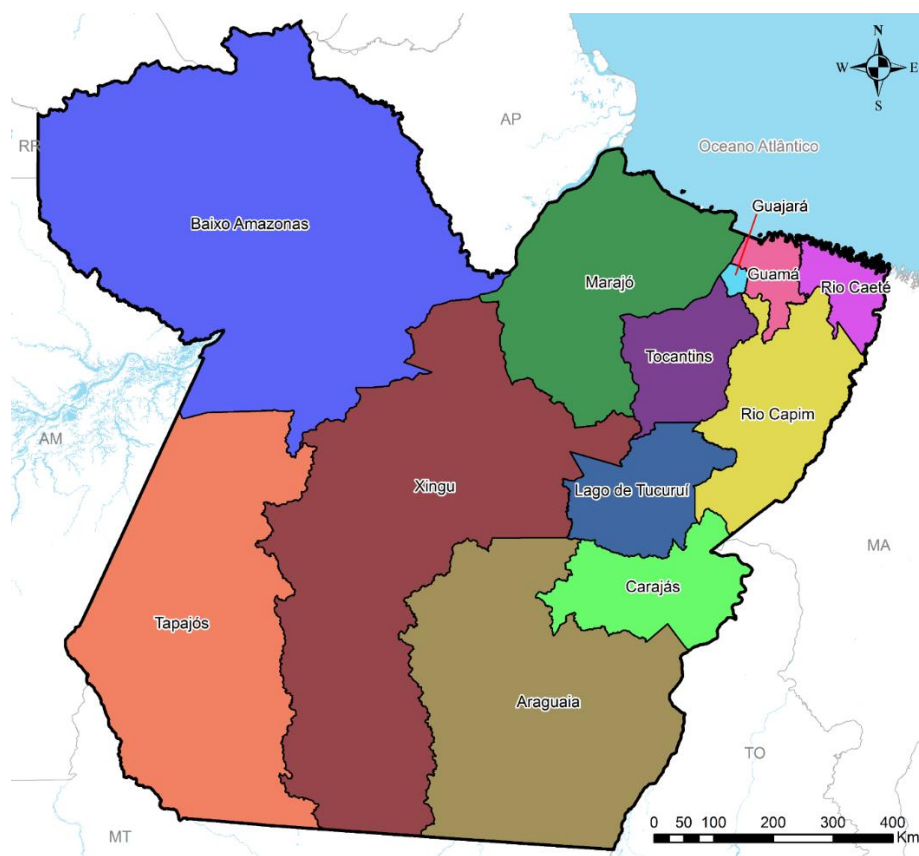


Figura 27 - Divisão regional do Estado do Pará

Fonte: (FAPESPA, 2016)

A grande vantagem de utilização deste documento consiste no fato do mesmo ter trabalhado com consultas aos 144 municípios, e apresentar informações otimizadas quanto a

logística, principalmente no que se refere a condição de estradas, fatores climáticos (pluviosidade ao longo do ano) e trafegabilidade entre municípios. Foram analisadas as regiões de integração com os municípios em que foram sugeridos aterros regionais, devido haver um agrupamento dos municípios próximos em função das estradas e distâncias.

Foram apresentadas no documento 24 possibilidades de agrupamento em 10 regiões de integração do estado abrangendo 73 municípios. Serão sugeridas soluções WTE com base principalmente nas melhores soluções apresentadas no capítulo anterior: aterro sanitário com captura de gás de aterro, reciclagem com digestão anaeróbica, venda de digestato e aterro sanitário, a destinação de reciclagem com incineração e aterro sanitário foi admitida para destinações com mais de um milhão de habitantes.

Foram admitidos que todo o RSU seria enviado para o município onde seriam implementadas as “destinações regionais” (DR), foi considerada uma geração diária de 0,97 kg/hab./dia (BRASIL, 2020a), um valor de CAPEX de 362.500,00 reais (BRENCORP, 2013) e de OPEX de 29 reais por tonelada para estações de transferência (COLVERO *et al.*, 2020), foram considerados os valores os custos de transporte para coleta de caminhões de 8 toneladas com um custo de coleta com entrega de 1,02 R\$/km entre municípios, e para municípios com estações de transferência caminhões de 20 toneladas com um custo de transporte de 0,4 R\$/km (BRENCORP, 2013), Foram considerados ainda os custos para viagens de ida e volta, todos os valores foram atualizados em função da inflação, todos estes valores monetários foram introduzidos nas linhas em branco do fluxo de caixa do algoritmo.

Por fim foi considerada a estimativa populacional da base de dados do IBGE, referente a 2021 (IBGE, 2022), A tabela 6 apresenta as regiões de integração selecionadas, os municípios sedes considerados para destinações regionais, bem como os municípios que compõem esta destinação regional, os módulos de transporte escolhidos: caminhões de coleta (caminhões de 8 t) que irão levar ao destino final, ou se serão levados das estações de transferências (caminhões de 20 t), os valores de população estimadas de 2021 de cada município a quantidade de caminhões de cada município e a distância entre municípios.

Tabela 6 - Principais informações levantadas

Região de Integração	Destinação Regional (DR)	Município	Módulo de transporte	Total estimado 2021 (hab)	Quantidade de caminhões	Distância (km)
Guajará	Marituba	Belém	Coleta	1.506.420	183	23
		Ananindeua	Transferência	540.410	66	4
		Benevides	Transferência	64.780	3	13,8
		Marituba	Coleta	135.812	0	0
		Santa Bárbara do Pará	Transferência	21.811	1	28,5
		Santa Isabel do Pará	Transferência	72.856	4	28,3
Tucuruí	Tucuruí	Tucuruí	Coleta	116.605	0	0
		Breu Branco	Coleta	68.597	8	8,8
		Goianésia do Pará	Transferência	41.678	2	74,6
	Bragança	Bragança	Coleta	130.122	0	0
		Augusto Corrêa	Coleta	46.937	6	16,9
		Tracuateua	Coleta	31.549	4	13
		Viseu	Transferência	62.093	3	92,2
Rio Caeté	Capanema	Bonito	Coleta	16.769	2	36,5
		Capanema	Coleta	69.828	0	0
		Nova Timboteua	Coleta	15.646	2	25,1
		Peixe-Boi	Coleta	8.084	1	15,3
		Primavera	Coleta	10.889	1	34,6
	Salinópolis	Salinópolis	Coleta	41.164	0	0
		São João de Pirabas	Coleta	23.440	3	154,1
Rio Capim	Capitão Poço	Capitão Poço	Coleta	54.545	0	0
		Garrafão do Norte	Transferência	26.155	1	23,8
		Ourém	Transferência	18.079	1	25,9
	Dom Eliseu	Dom Eliseu	Coleta	61.206	0	0
Rondon do Pará		Transferência	53.242	3	86,6	

Região de Integração	Destinação Regional (DR)	Município	Módulo de transporte	Total estimado 2021 (hab)	Quantidade de caminhões	Distância (km)	
		Ulianópolis	Transferência	62.286	3	60,9	
Rio Capim		Aurora do Pará	Transferência	32.200	2	8,5	
	Mãe do Rio	Concórdia do Pará	Transferência	34.236	2	46,4	
		Mãe do Rio	Coleta	30.389	0	0	
	Paragominas	Paragominas	Coleta	115.838	0	0	
Ipixuna do Pará		Transferência	67.170	3	52,9		
Tocantins		Abaetetuba	Coleta	160.439	0	0	
	Abaetetuba	Barcarena	Transferência	129.333	6	52,4	
		Igarapé-Miri	Transferência	63.367	3	42,9	
		Moju	Coleta	84.251	10	25,7	
	Mocajuba	Baião	Coleta	49.454	6	33,8	
		Mocajuba	Coleta	31.917	0	0	
	Oeiras do Pará	Oeiras do Pará	Coleta	33.182	0	0	
		Currálinho	Transferência (Balsa)	35.530	2	3,8	
	Araguaia		Redenção	Coleta	86.326	0	0
		Redenção	Conceição do Araguaia	Transferência	48.115	2	91,9
Pau D'Arco			Coleta	5.339	1	26,9	
Tucumã		Ourlândia do Norte	Transferência	33.831	2	8,9	
		Tucumã	Coleta	40.661	0	0	
Xinguara		Rio Maria	Coleta	18.208	0	0	
		Sapucaia	Coleta	6.088	1	35,5	
	Xinguara	Coleta	45.416	6	114		
Baixo Amazonas	Oriximiná	Óbidos	Transferência	52.473	6	80,5	
		Oriximiná	Coleta	74.921	0	0	
Carajás	Bom Jesus do Tocantins	Bom Jesus do Tocantins	Coleta	17.254	0	0	

Região de Integração	Destinação Regional (DR)	Município	Módulo de transporte	Total estimado 2021 (hab)	Quantidade de caminhões	Distância (km)
Carajás		Abel Figueiredo	Transferência	7.536	1	26,33
	Marabá	Marabá	Coleta	287.664	0	0
		São Domingos do Araguaia	Transferência	25.945	1	55
	Palestina do Pará	Brejo Grande do Araguaia	Coleta	7.357	1	15,9
		Palestina do Pará	Coleta	7.575	0	0
	Parauapebas	Canaã dos Carajás	Transferência	39.103	2	67,3
		Curionópolis	Transferência	17.764	1	40,7
		Eldorado dos Carajás	Transferência	34.069	2	66,8
		Parauapebas	Coleta	218.787	0	0
	Guamá		Castanhal	Coleta	205.667	0
		Inhangapi	Transferência	12.009	1	6,3
		Santa Maria do Pará	Transferência	25.127	1	40,7
		Santo Antônio do Tauá	Transferência	32.346	2	44,4
Castanhal		São Francisco do Pará	Transferência	15.978	1	20,3
		São Miguel do Guamá	Transferência	60.268	3	72,9
		Terra Alta	Transferência	11.971	1	29,5
		Vigia	Transferência	54.650	3	84
		Irituia	Transferência	32.639	2	93,65
		São Caetano de Odivelas	Transferência	18.207	1	96,2
Curuçá	Curuçá	Coleta	41.093	0	0	
	Marapanim	Transferência	28.563	1	30,4	

Região de Integração	Destinação Regional (DR)	Município	Módulo de transporte	Total estimado 2021 (hab)	Quantidade de caminhões	Distância (km)
Marajó	Soure	Soure	Coleta	24.392	0	0
		Salvaterra	Transferência	25.752	1	5

Todos os custos foram realizados individualmente para cada município, compartilhando apenas os custos com a destinação regional devido o fator de escala.

5.1. Resultados

Serão apresentados a seguir a sugestão de destinação regional para os resíduos sólidos das regiões de integração do estado do Pará. Foi considerado para o cálculo do percentual da renda mínima da população o valor de meio salário mínimo brasileiro para o ano de 2022, uma vez que cerca de 50 % da população declarou no último censo ganhar este valor nos municípios paraenses (IBGE, 2022).

As figuras 28 - 57 apresentam as sugestões de destinação regional, com os municípios com condições de transportarem seus resíduos, o custo anual com pagamentos da taxa de contribuição da população e o valor de TCP que deverá ser pago pela população de cada município.

5.1.1. Região de integração - Araguaia

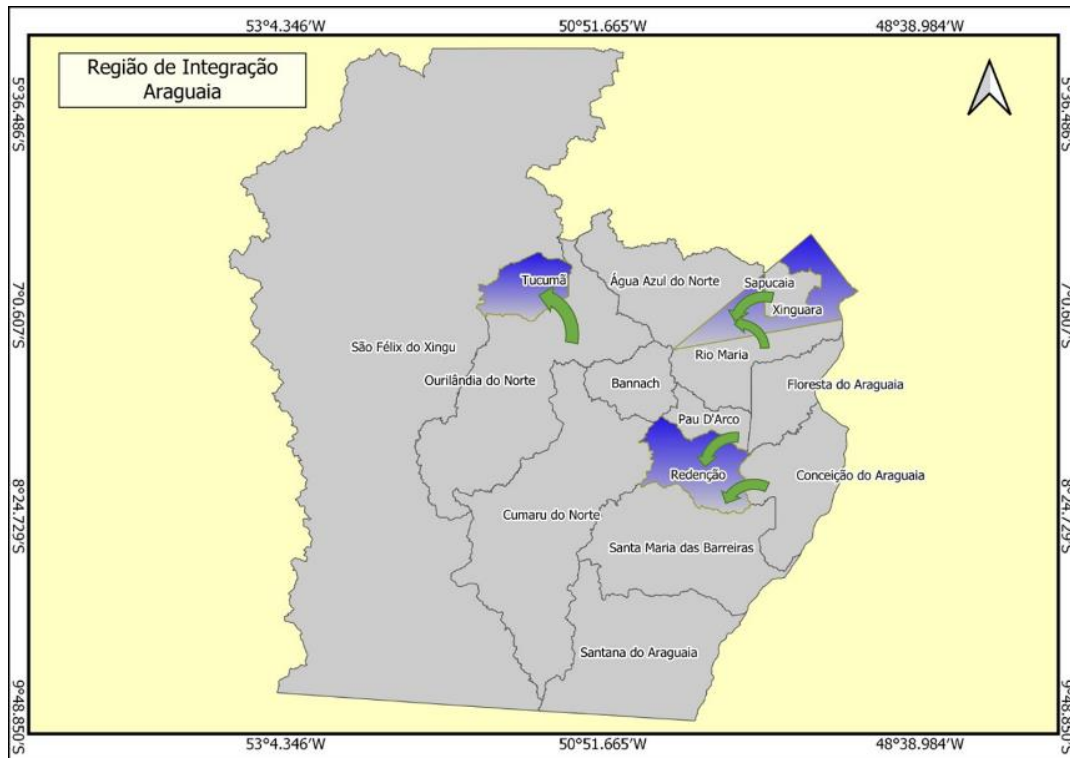


Figura 28 - Sugestão de destinação regional para RI-Araguaia

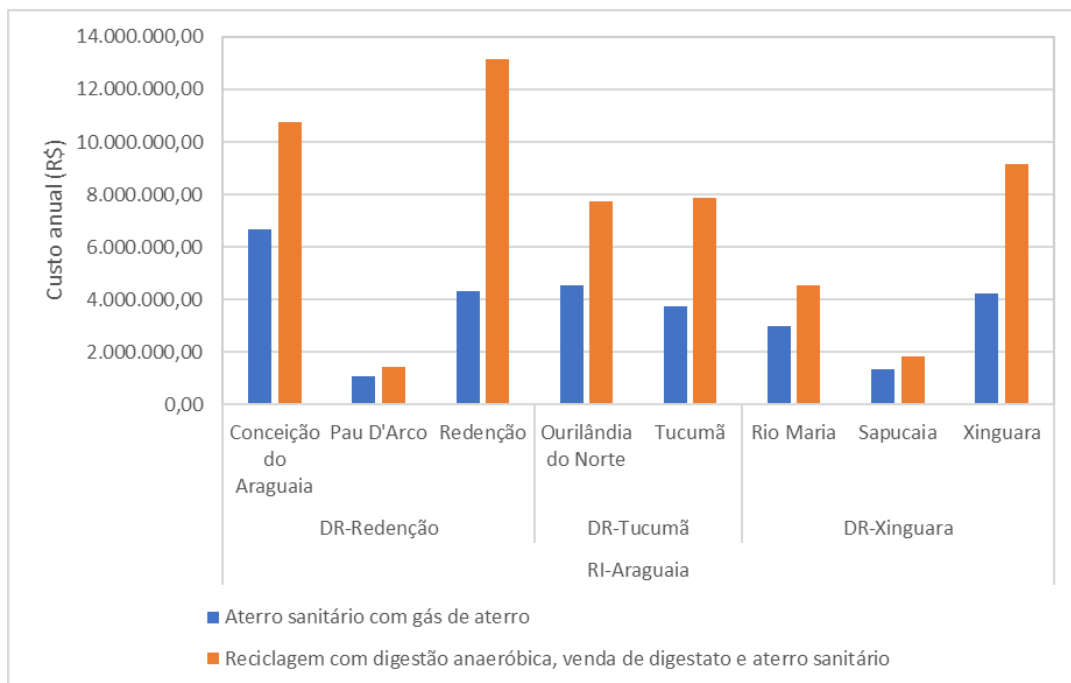


Figura 29 - Custo anual com TCP RI-Araguaia

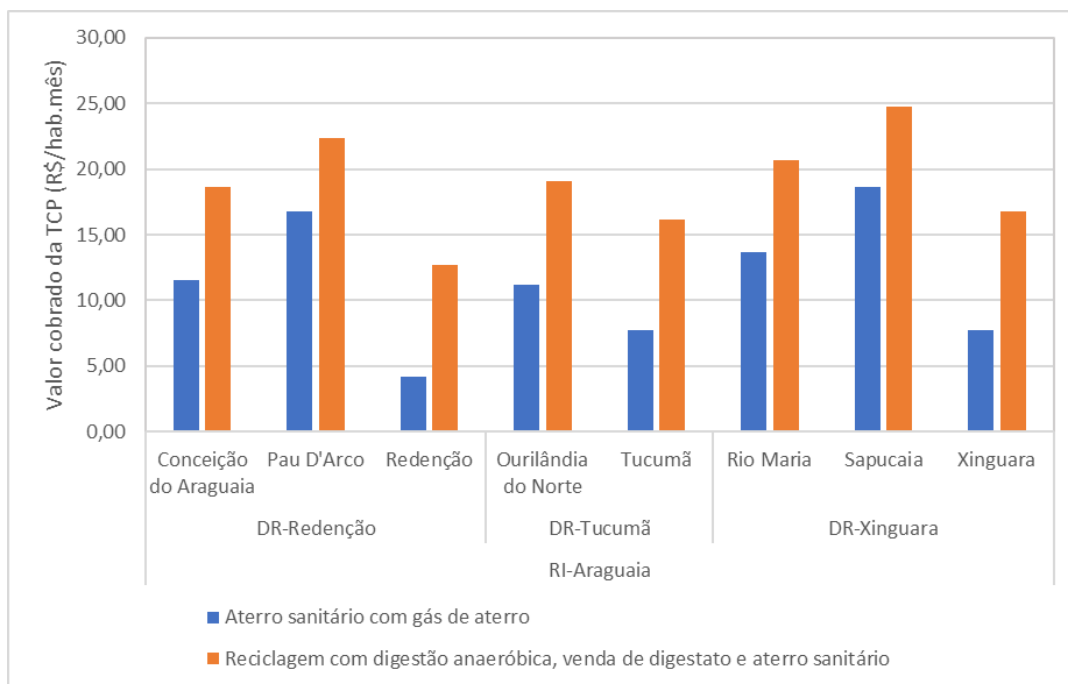


Figura 30 - Custo por habitante mês RI-Araguaia

A região de integração do Araguaia apresentou-se 3 possibilidades de destinações regionais, DR Redenção, com valores de TCP entre 11,56 e 18,65 reais por habitante mês para o municípios e Conceição do Araguaia, e 16,8 e 22,36 reais por habitante mês para o município de Pau D'Arco, o município de Redenção apresentou valores entre 4,14 e 12,7 reais por habitante mês, para DR-Tucumã, Ourilândia do norte apresentou os maiores valores de referência com 19,05 reais por habitante mês, por fim DR-Xinguara o município de Sapucaia foi o com maiores valores variando entre 18,59 e 24,72 reais por habitante mês, os municípios sedes como era de se esperar apresentaram os menores valores de TCP com valores entre 4,14 e 16,78 reais por habitante mês. O percentual máximo na renda da população dos municípios ficou em torno de 2,8 % de meio salário mínimo.

5.1.2. Região de integração – Baixo Amazonas

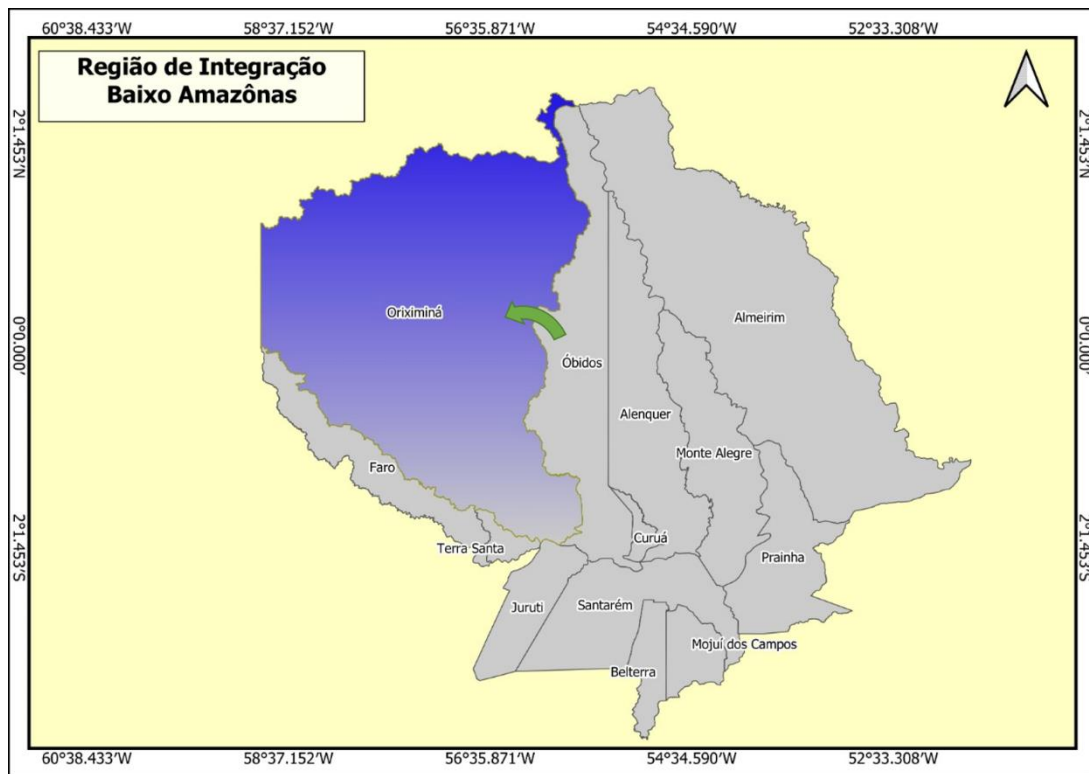


Figura 31 - Sugestão de destinação regional para RI-Baixo Amazonas

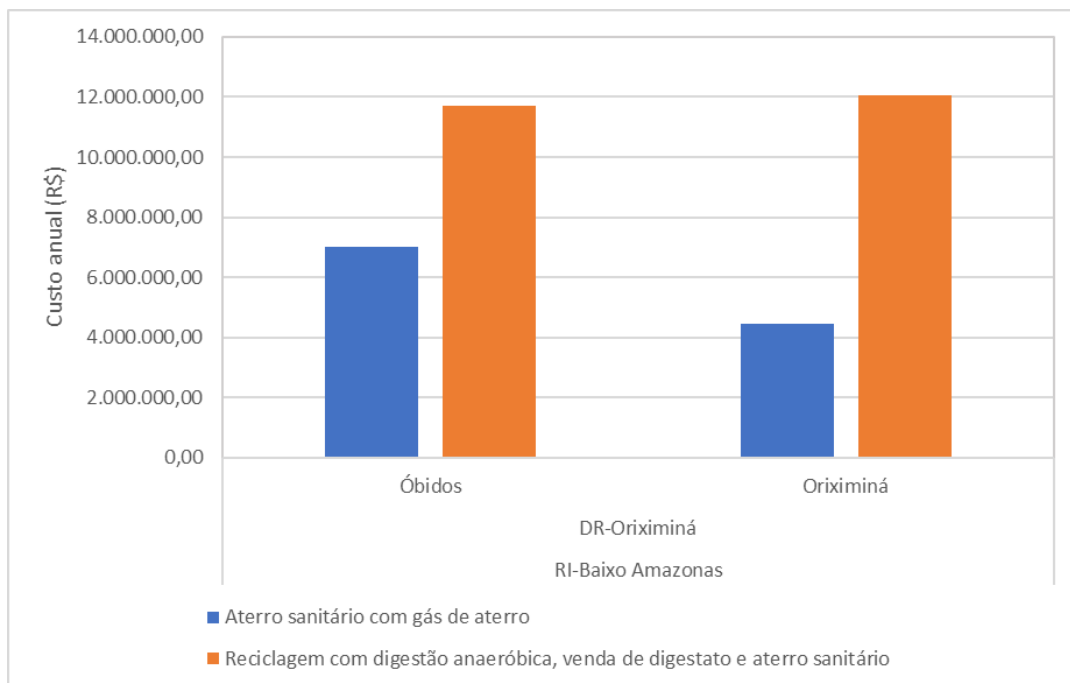


Figura 32 - Custo anual com TCP RI-Baixo Amazonas

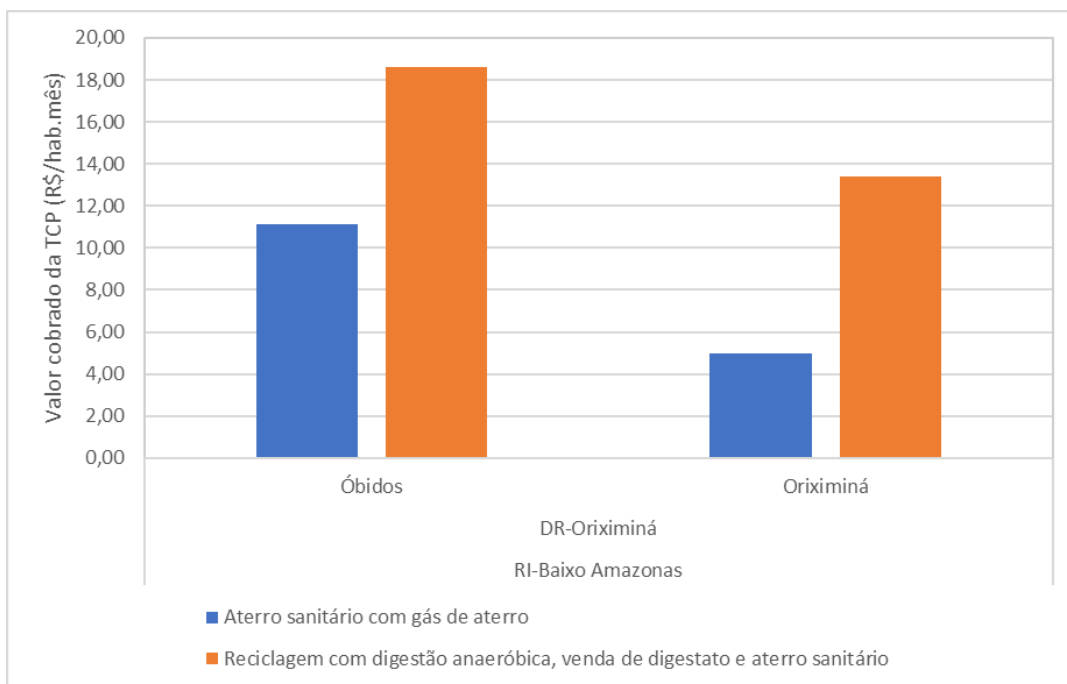


Figura 33 - Custo por habitante mês RI-Baixo Amazonas

Para a região de integração do Baixo Amazonas os valores TCP ficaram no máximo 18,61 reais por habitante mês para a reciclagem, digestão anaeróbica com venda de digestato e aterro sanitário, e mínimo de 11,15 reais por habitante mês para aterro sanitário com gás de aterro para o município de Óbidos e valores entre 4,07 e 13,4 reais por habitante mês para os municípios de Oriximiná. O percentual máximo na renda da população dos municípios ficou em torno de 3,1 % para o município de Óbidos, e 2,2% para Oriximiná.

5.1.3. Região de integração – Guamá

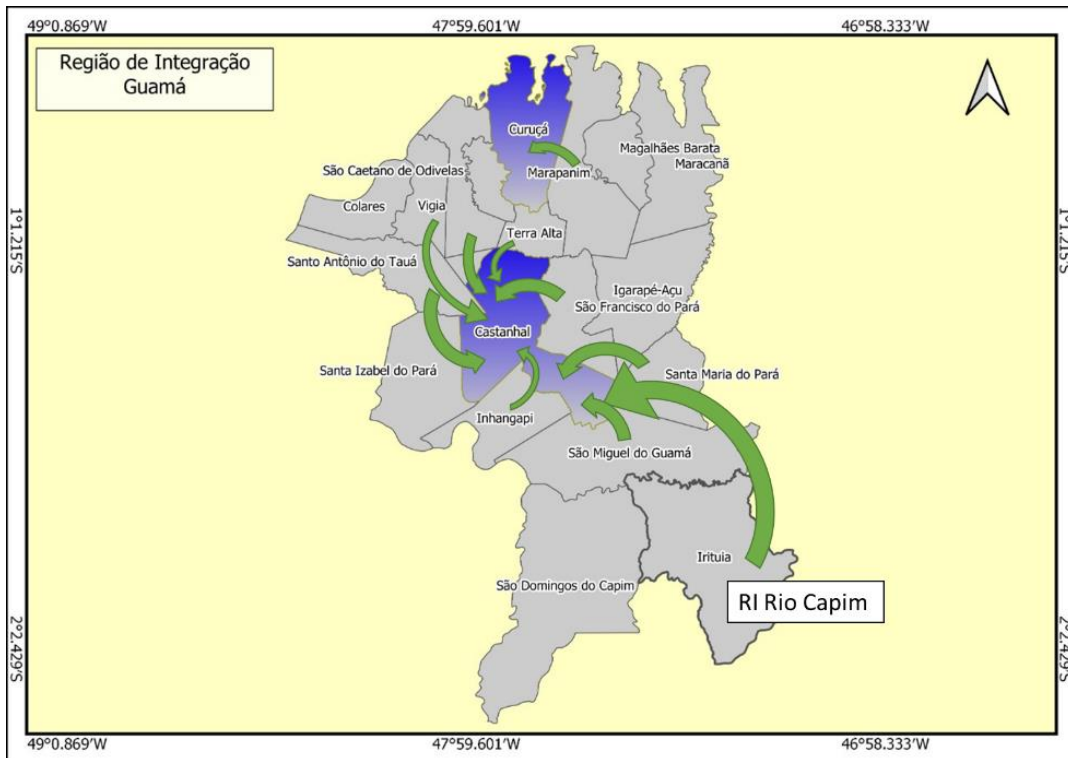


Figura 34 - Sugestão de destinação regional para RI-Guamá

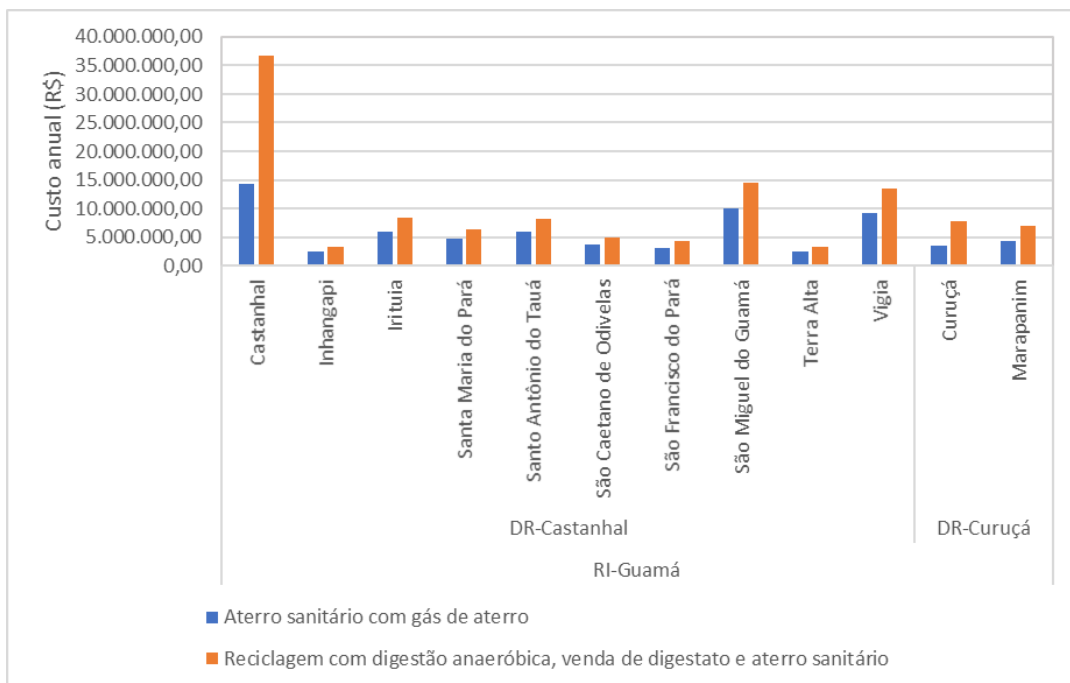


Figura 35 - Custo anual com TCP RI-Guamá

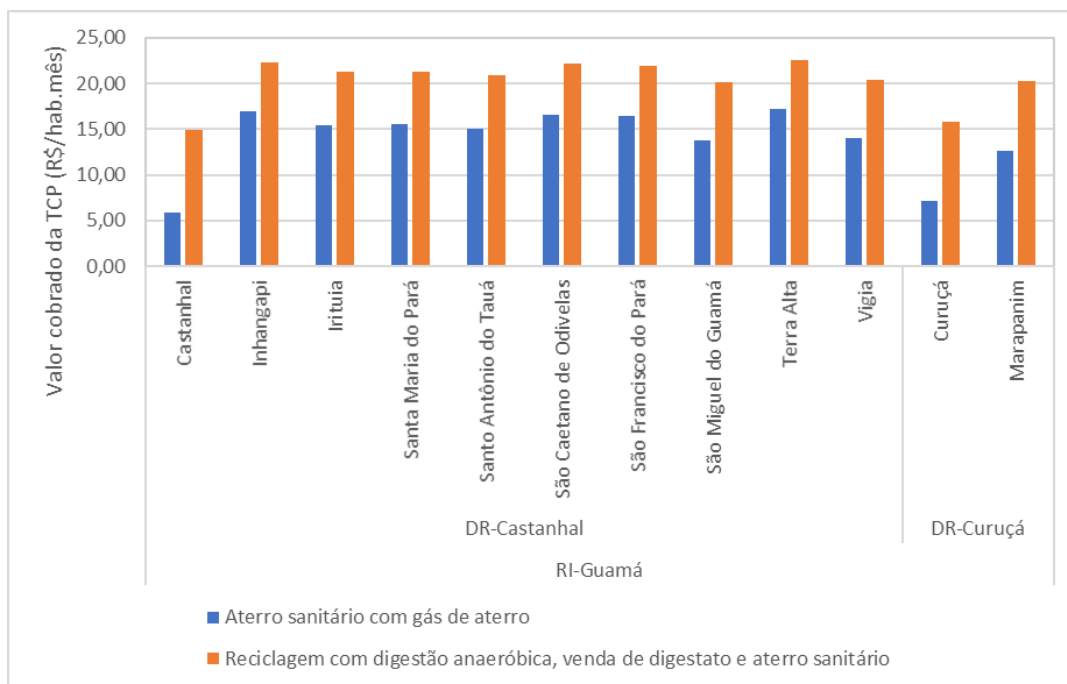


Figura 36 - Custo por habitante mês RI-Guamá

Para região de integração do Guamá apresentou 2 possibilidades de destinações regionais, DR castanhal, com custos anuais máximos em 36,8 milhões de reais por ano para o município de Castanhal para a destinação regional de reciclagem, digestão anaeróbica com venda de digestato e aterro sanitário, com valores de TCP máximos em 14,92 reais por habitante mês, este valor se deve ao fato da potência instalada do sistema de geração de energia ultrapassar os 5 MW do sistema de créditos de energia ficando a energia comercializada com o valor de leilão de energia (0,29 centavos o kWh), os demais municípios ficaram com custos anuais abaixo dos 10 milhões de reais por ano, com exceção de São Miguel do Guamá e Vigia, que ficaram com valores próximos de 14,5 milhões de reais por ano. Para DR-Curuçá, os custos anuais ficaram em no máximo 8,4 milhões de reais por ano, os TCPs da DR-Castanhal ficaram em no máximo 24,06 reais por habitante mês representando cerca de 4% do percentual de renda mínima dos municípios, já para o DR-Curuçá o TCP ficou máximo de 21,69 reais por habitante mês para o município de Marapanim com cerca de 3,6% e Curuçá com o valor de 17,2 e 2,9% do percentual de renda mínima.

5.1.4. Região de integração – Carajás

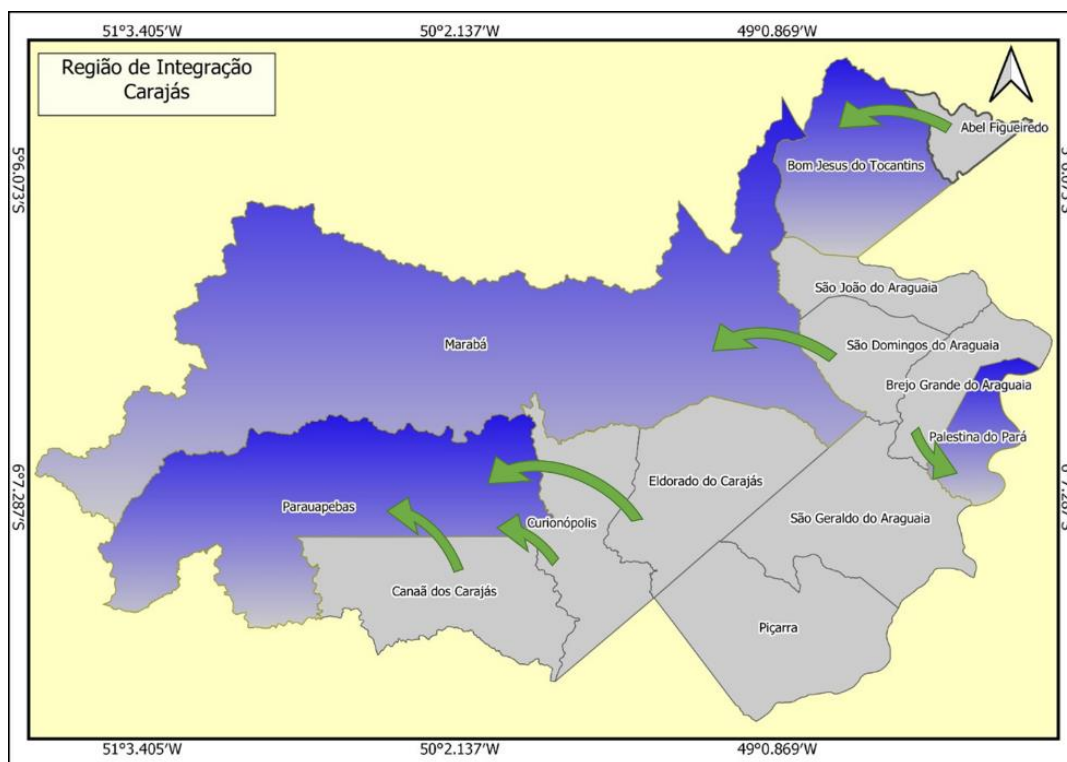


Figura 37 - Sugestão de destinação regional para RI-Carajás

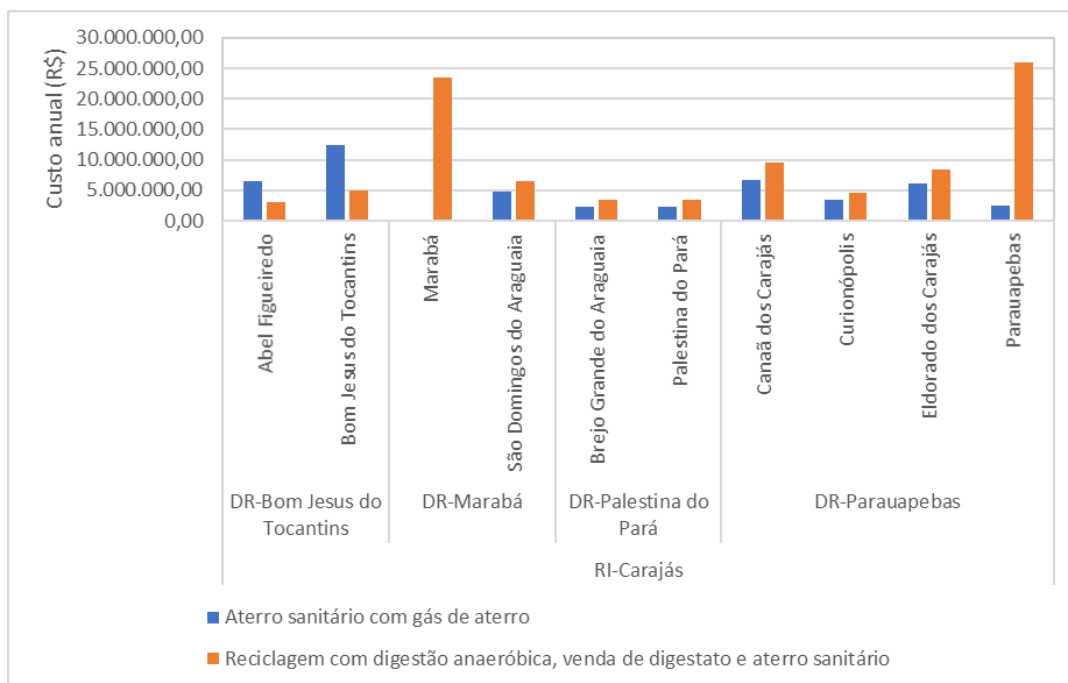


Figura 38 - Custo anual com TCP RI-Carajás

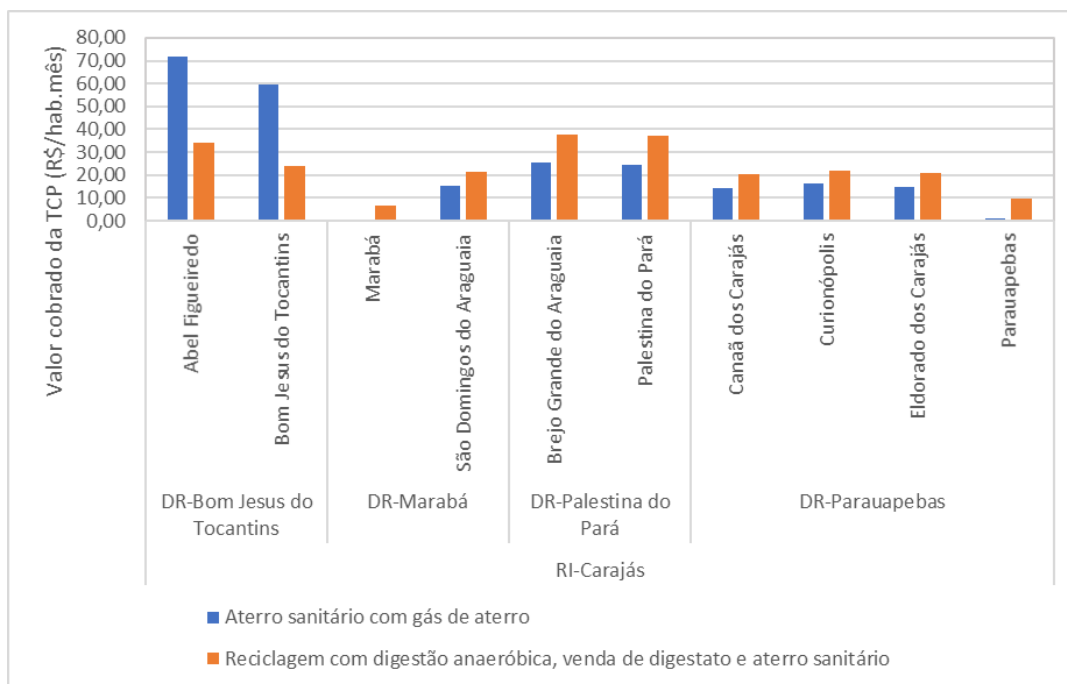


Figura 39 - Custo por habitante mês RI-Carajás

A região de integração do Carajás apresentou 4 possibilidades de destinações regionais, DR Bom Jesus do Tocantins, com custos anuais máximos de 12,3 milhões reais por ano para o município de Bom Jesus do Tocantins e 6,5 milhões reais por ano para Abel figueiredo, com valores de TCP 59,65 reais para o município de Bom Jesus do Tocantins e 72,06 reais por ano para Abel Figueiredo representando 9,9% e 11,9 % da renda mínima dos municípios respectivamente para a destinação de Aterro sanitário com gás de aterro, muito provavelmente pelos maiores custos do aterro sanitário em relação aos pequenos digestores, devido a pequena população destes dois municípios.

No DR Marabá o Custo Anual máximo ficou próximo dos 23,4 milhões de reais por ano com cobrança de TCP apenas para a destinação de reciclagem, digestão anaeróbica com venda de digestato e aterro sanitário em 6,79 reais por habitante mês representado 1,1% da renda mínima do município e 6,6 milhões de reais por ano para o município de São Domingos do Araguaia com cobrança de 21,17 reais por habitante mês representando 3,5 % da renda mínima, para o DR-Palestina do Pará os valores ficaram próximos de 3,3 milhões de reais por ano, para ambos os municípios com valores de TCP em torno dos 37 reais por habitante mês representando 6,1 % da renda mínima do município.

E para o DR Parauapebas os custos anuais ficaram no máximo em 26 milhões de reais por ano para o município de Parauapebas com cobrança de TCP também apenas para a destinação com digestão anaeróbica de 9,92 reais por habitante mês representando 1,6% da renda mínima,

próximo dos 10 milhões de reais por ano para os municípios de Eldorado dos Carajás e Canaã do Carajás om TCP de 20,33 reais por habitante mês com 3,4 % e 5 milhões por ano para o município de Curionópolis com TCP de 21,87 reais por habitante mês e 3,6% da renda mínima.

5.1.5. Região de integração – Lago de Tucuruí

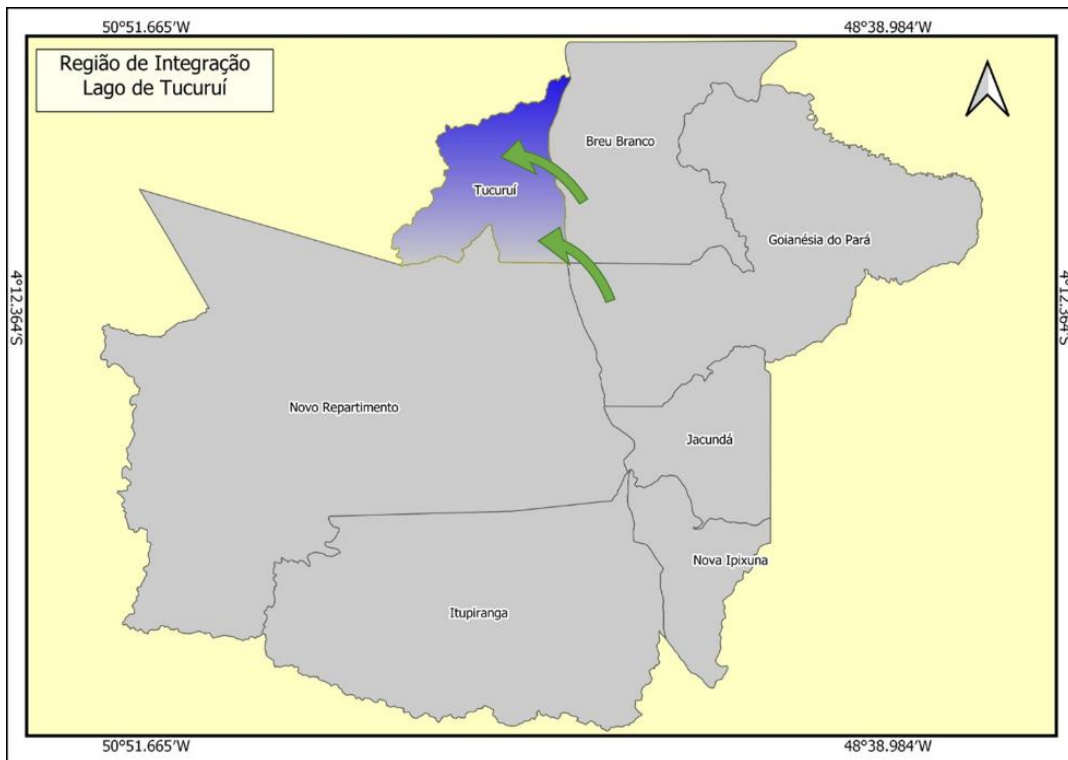


Figura 40 - Sugestão de destinação regional para RI-Lago de Tucuruí

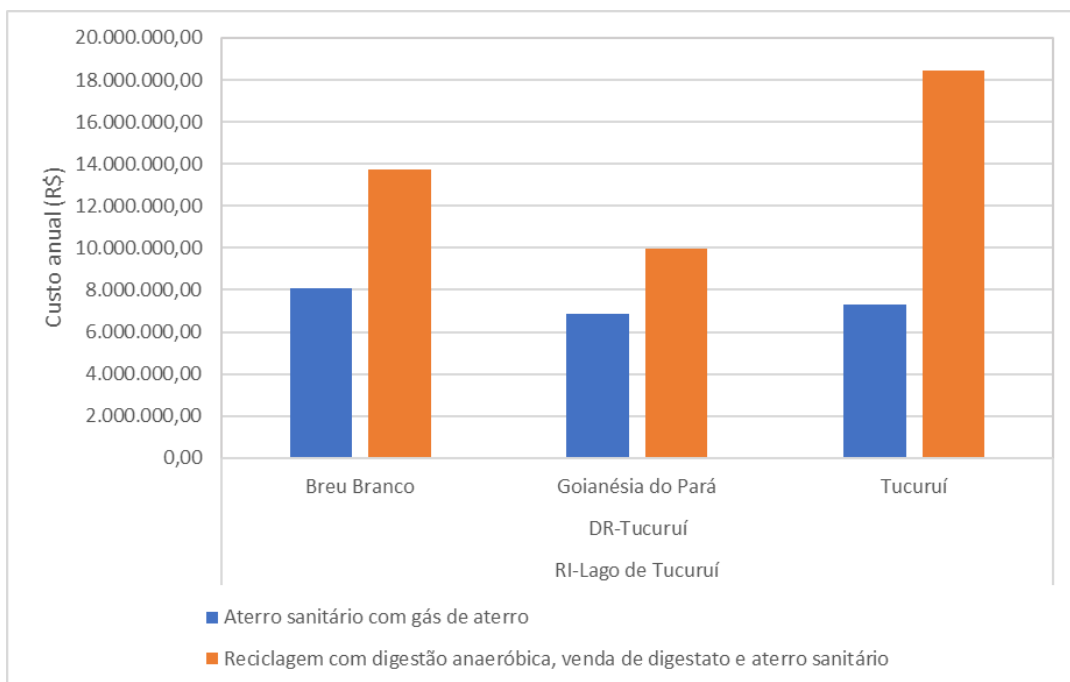


Figura 41 - Custo anual com TCP RI-Lago de Tucuuruí

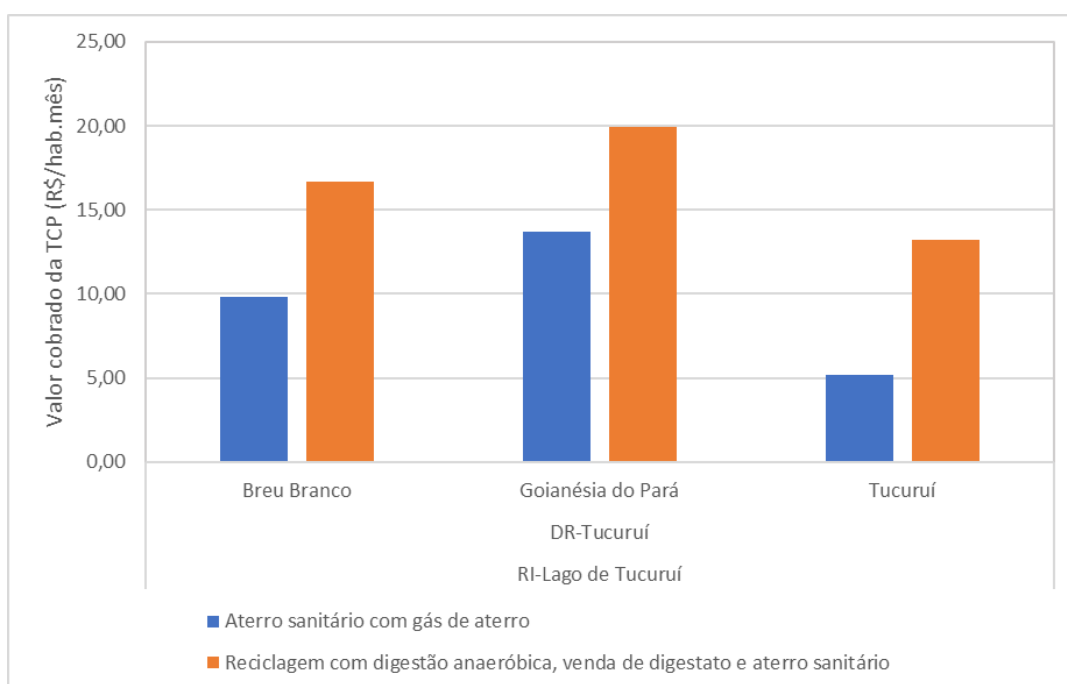


Figura 42 - Custo por habitante mês RI-Lago de Tucuuruí

A região de integração do Lago de Tucuuruí apresentou 1 possibilidade de destinações regionais, DR-Tucuuruí, com custos anuais mínimos próximos de 8 milhões de reais por ano para os municípios de Tucuuruí e Breu Branco, Goianésia do Pará ficou com custos anuais mínimos de 6,8 milhões de reais por ano, os valores de TCP ficaram em no mínimo 13,73 reais por habitante mês para o município de Goianésia do Pará, com 2,3 %, 9,8 reais por habitante mês para Breu Branco com 1,6 % e 5,22 reais por habitante mês para o município de Tucuuruí representando 0,9% da renda mínima dos municípios.

5.1.6. Região de integração - Marajó

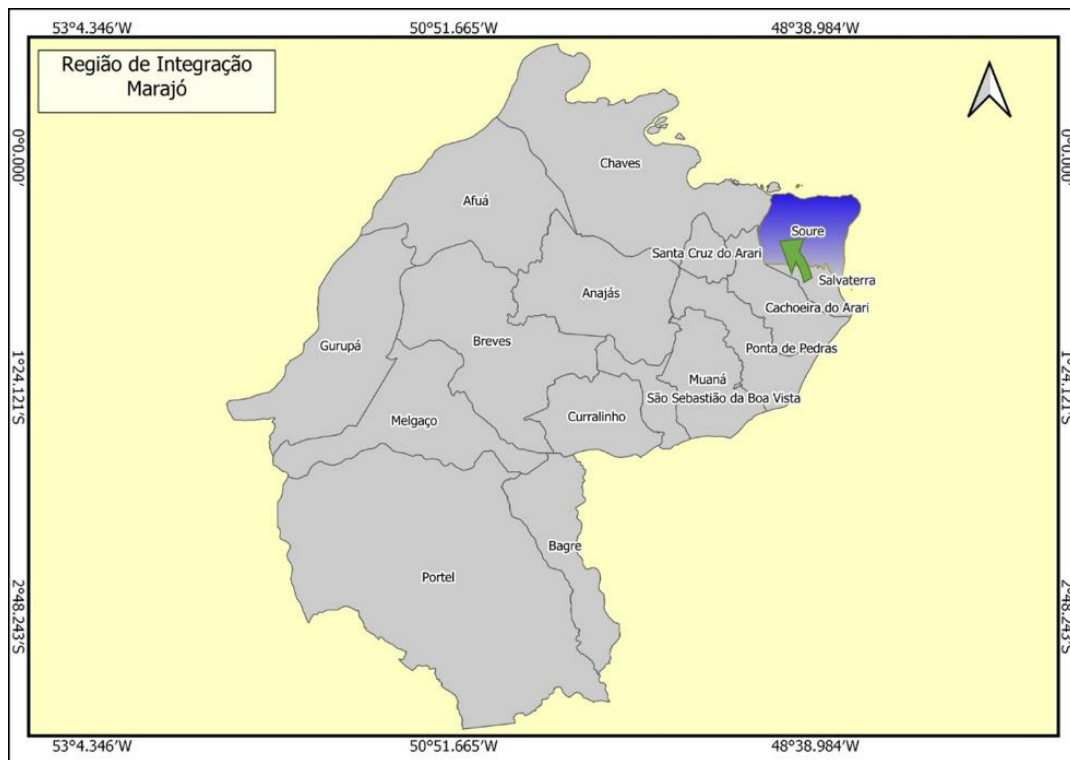


Figura 43 - Sugestão de destinação regional para RI-Marajó

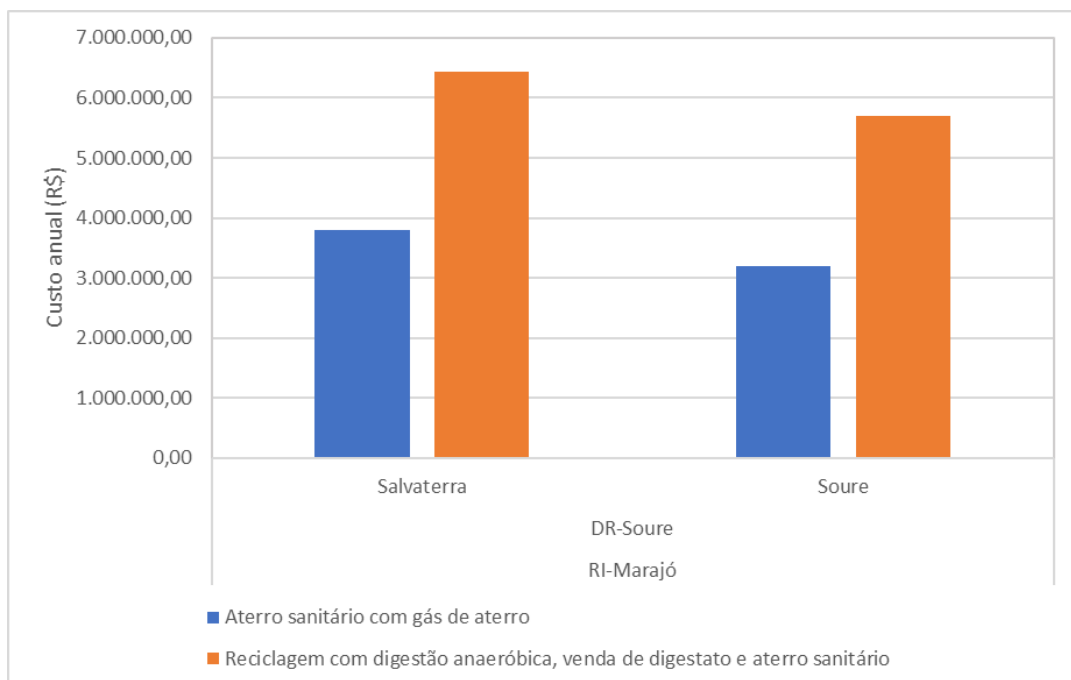


Figura 44 - Custo anual com TCP RI-Marajó

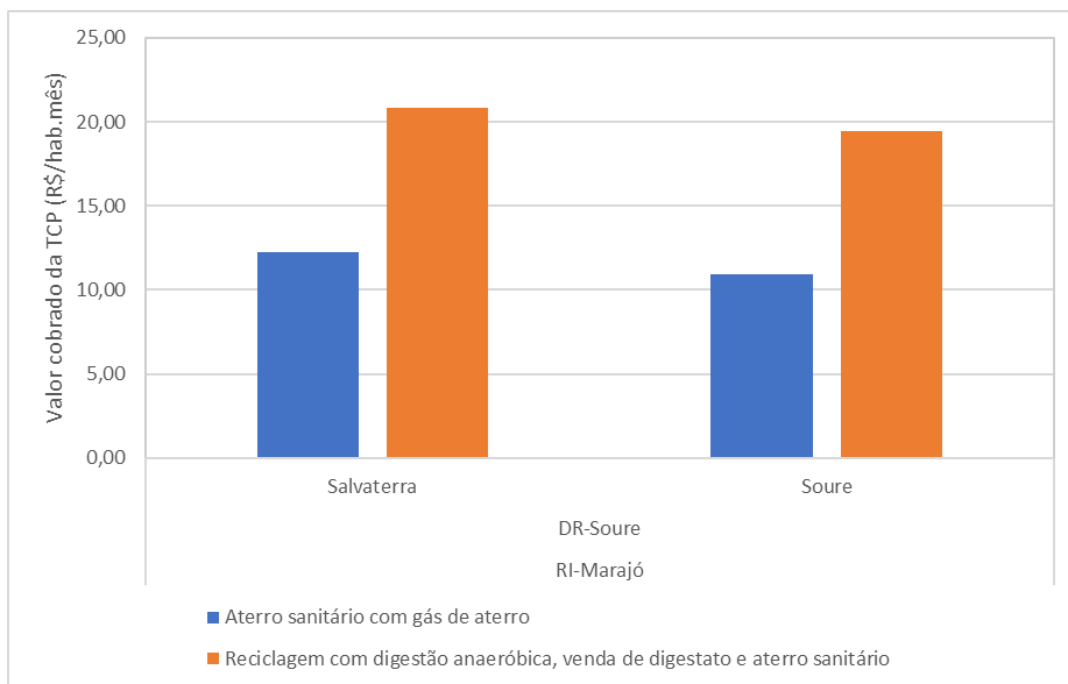


Figura 45 - Custo por habitante mês RI-Marajó

A região de integração do Marajó também apresentou apenas 1 possibilidade de destinações regionais, DR-Soure, com custos anuais entre 3,8 e 6,4 milhões de reais por ano, com um TCP máximo de 20,83 reais por habitante mês e percentual de renda mínima de 3,3 % para o município de Salva Terra e máximo de 5,7 milhões de reais por ano com um TCP de 19,48 reais por habitante mês e um percentual de renda mínima de 2,2 % para o município de Soure.

5.1.7. Região de integração - Guajará

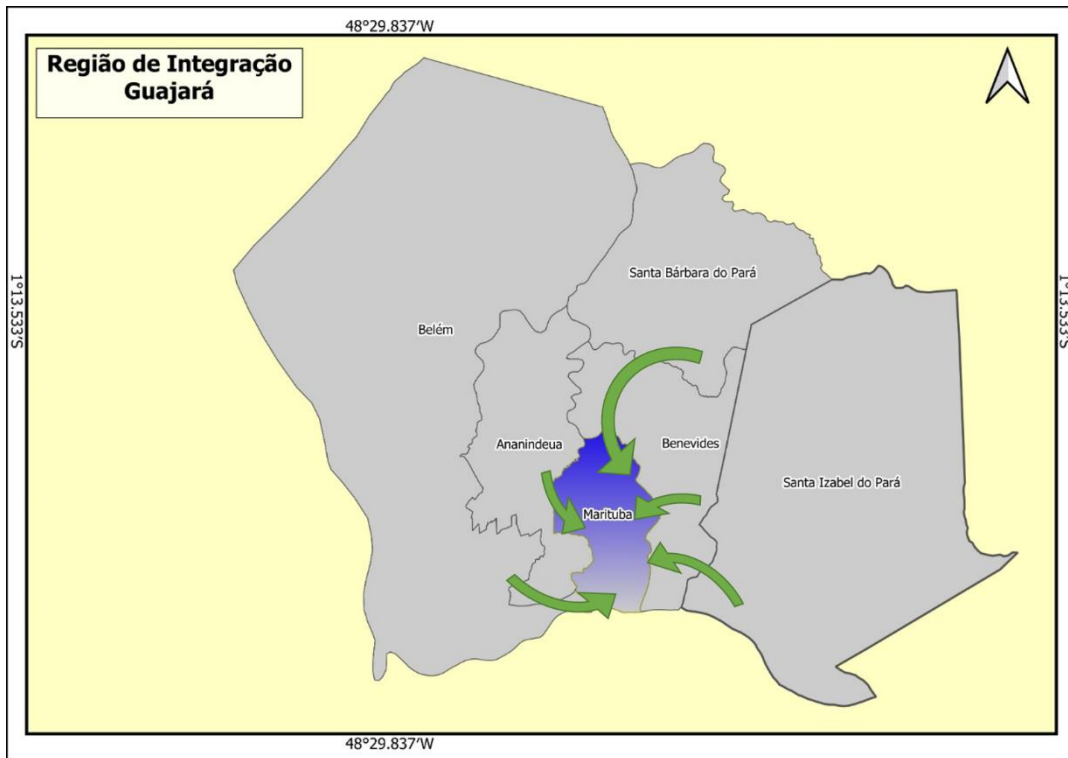


Figura 46 - Sugestão de destinação regional para RI-Guajará

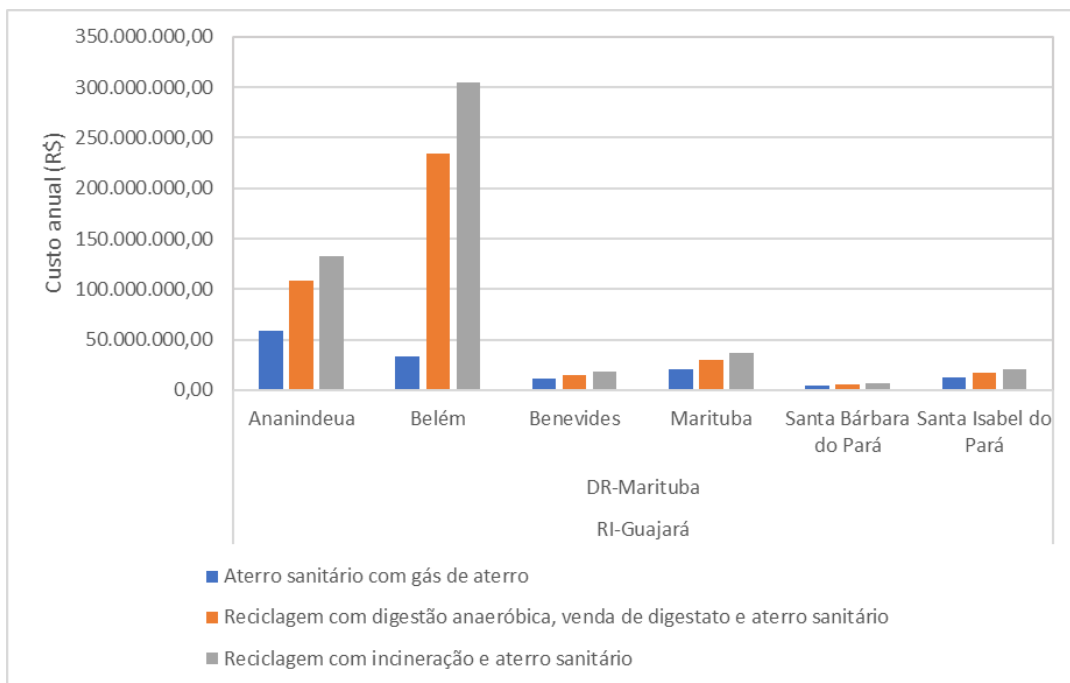


Figura 47 - Custo anual com TCP RI-Guajará

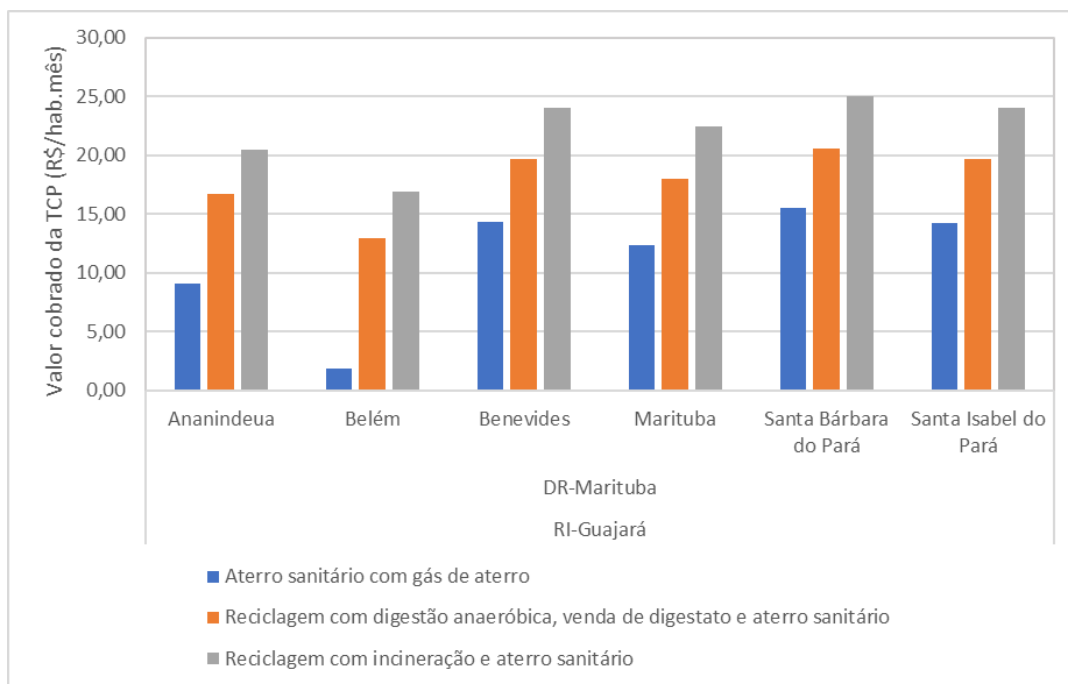


Figura 48 - Custo por habitante mês RI-Guajará

A região de integração do Guajará também foi sugerida apenas uma possibilidade de destinação regional, a DR-Marituba, com custos anuais entre 33,5 e 305 milhões de reais por ano para o município de Belém, 60 e 133 milhões reais por ano para o município de Ananindeua, os demais municípios com custos anuais abaixo dos 21 milhões de reais por ano, com um TCP máximo de 25,05 reais por habitante mês para todos os municípios e percentual de renda mínima de 4,1% para todos os municípios para a destinação de reciclagem com incineração e aterro sanitário para o município de Santa Bárbara do Pará.

5.1.8. Região de integração – Rio Caeté

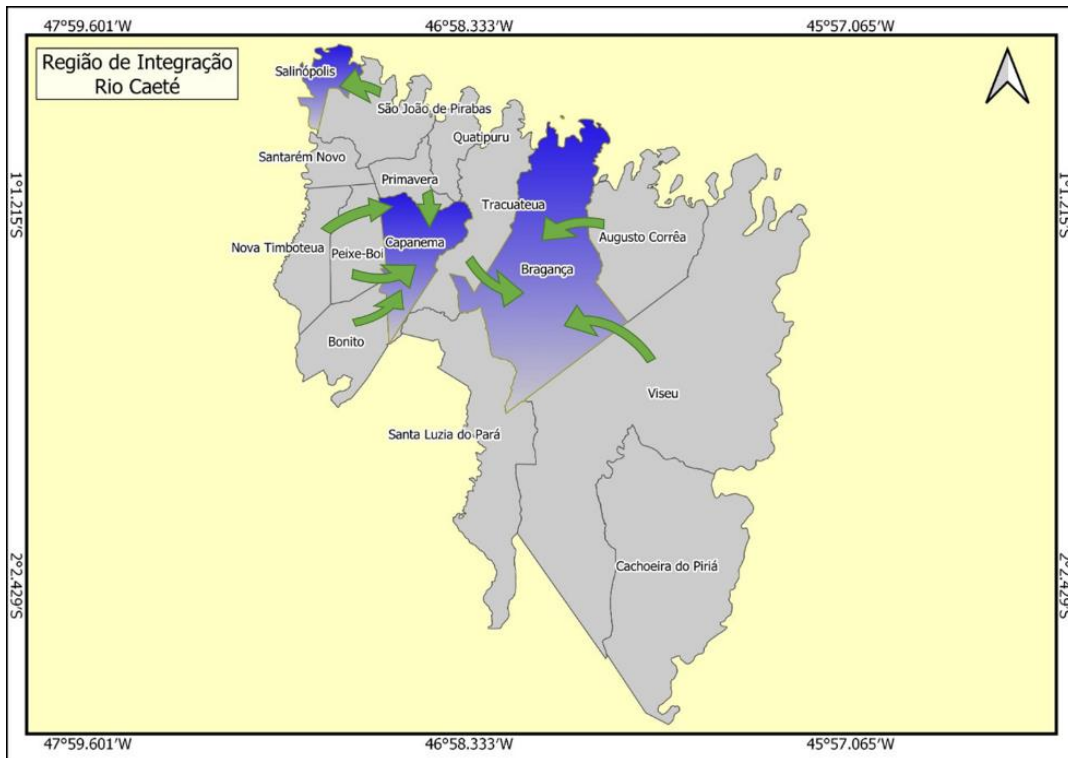


Figura 49 - Sugestão de destinação regional para RI-Rio Caeté

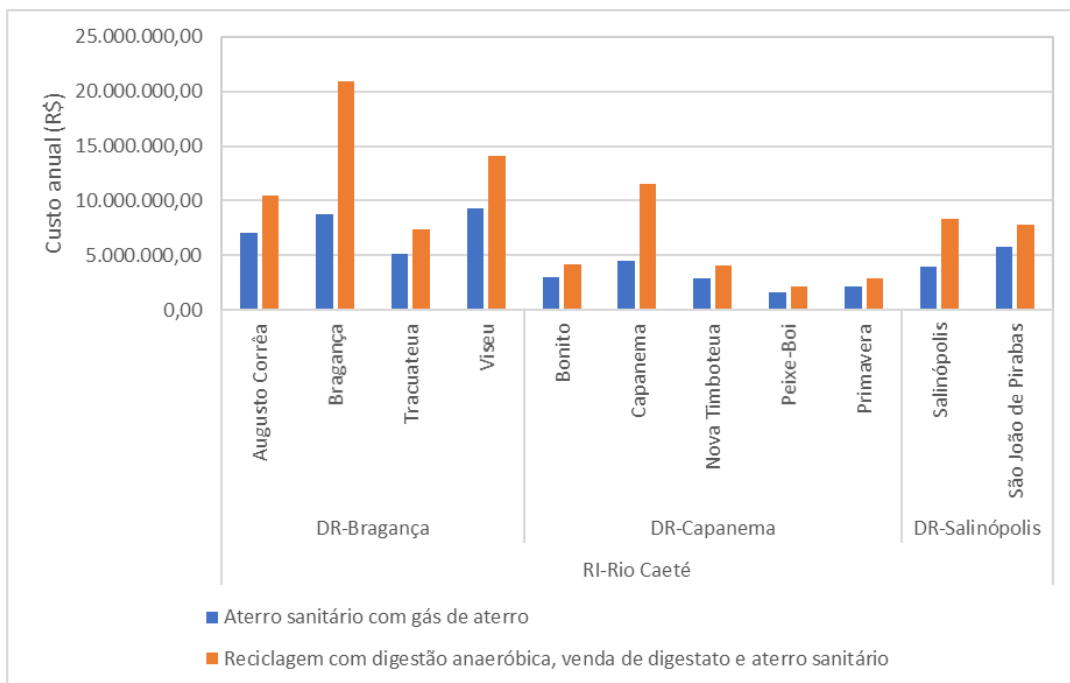


Figura 50 - Custo anual com TCP RI-Rio Caeté

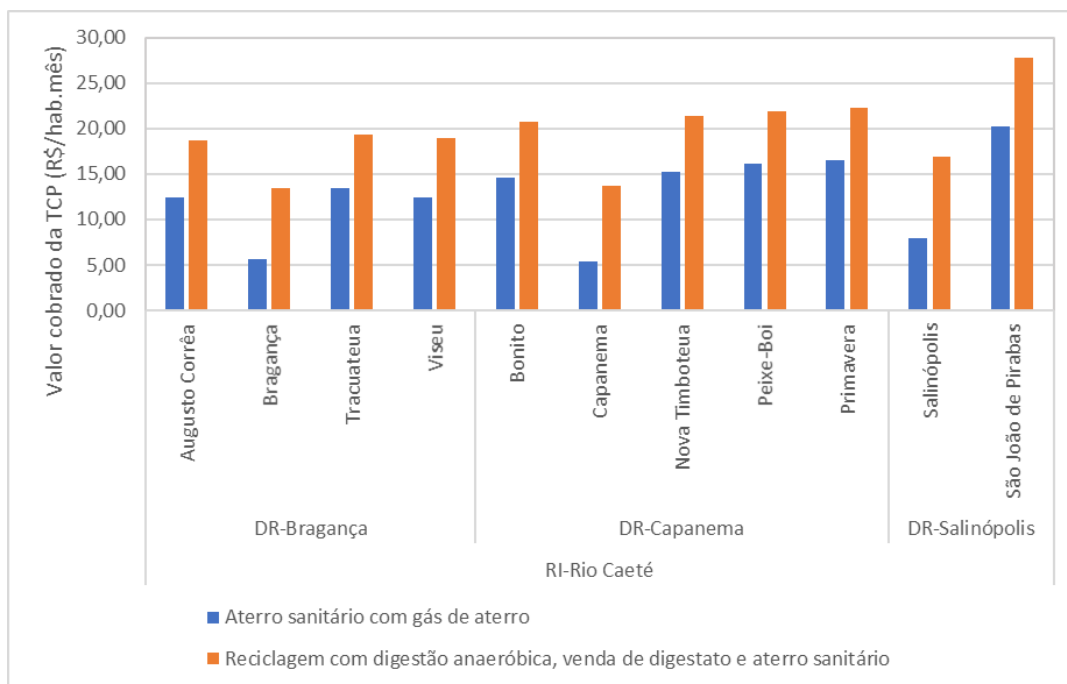


Figura 51 - Custo por habitante mês RI-Rio Caeté

A região de integração do Rio Caeté apresentou 3 possibilidade de destinações regionais, a DR-Bragança, com custos anuais acima dos 8,7 milhões de reais por ano para o município de Bragança, 9,3 milhões de reais por ano para o município de Viséu, 7 milhões reais por ano para o município de Augusto Corrêa e 5 milhões de reais por ano no município de Tracuateua, já os valores de TCP ficaram entre 12,47 e 18,94 reais por habitante mês para Viséu representando pouco menos de 3,1%, 12,43 e 19,33 reais por habitante mês para os municípios de Tracuateua e Augusto Corrêa, representando entre 2 e 3,2% respectivamente do percentual de renda mínima e por fim Bragança com TCP máximo entre 5,61 e 13,42 reais por habitante mês, representando entre 0,93 e 2,5 % da renda mínima.

Para o DR-Capanema os custos anuais ficaram acima dos 4,4 milhões de reais por ano para o município de Capanema, em torno dos 3,7 milhões de reais por ano para os municípios de Bonito e Nova Timboteua e abaixo dos 3,1 milhões de reais por ano para os municípios de Primavera e Peixe-Boi, os valores máximos de TCP ficaram em 22,34 reais por habitante mês para Primavera, representando pouco mais de 3,7%, 21,87 reais por habitante mês para os municípios de Peixe-Boi, Bonito e Nova Timboteua, representando 3,6 % do percentual de renda mínima e por fim Capanema com TCP máximo de 13,73 reais por habitante mês, representando 2,3% da renda mínima.

Por fim o DR-Salinópolis com custos anuais entre 3,9 e 8,4 milhões de reais por ano com TCP entre 7,99 e 16,96 reais por habitante mês representando entre 1,3 e 2,8 % da renda mínima

para o município de Salinópolis no máximo 7,8 milhões de reais por ano com um TCP de 27,81 reais e 4,6% da renda mínima para o município de São João de Pirabas.

5.1.9. Região de integração – Rio Capim

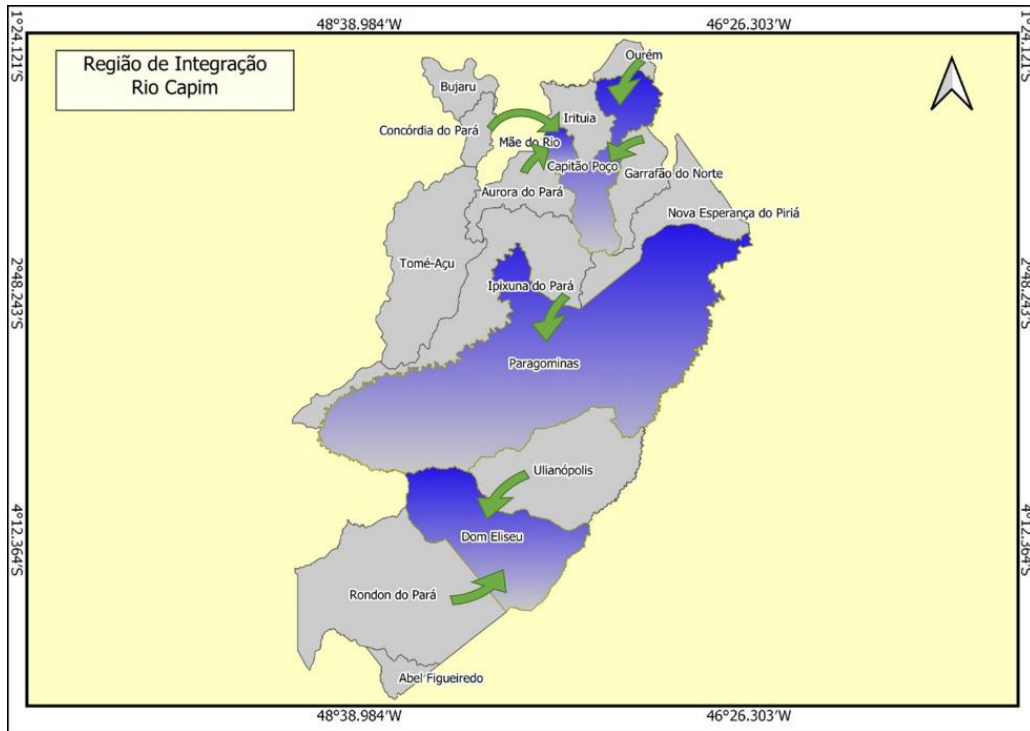


Figura 52 - Sugestão de destinação regional para RI-Rio Capim

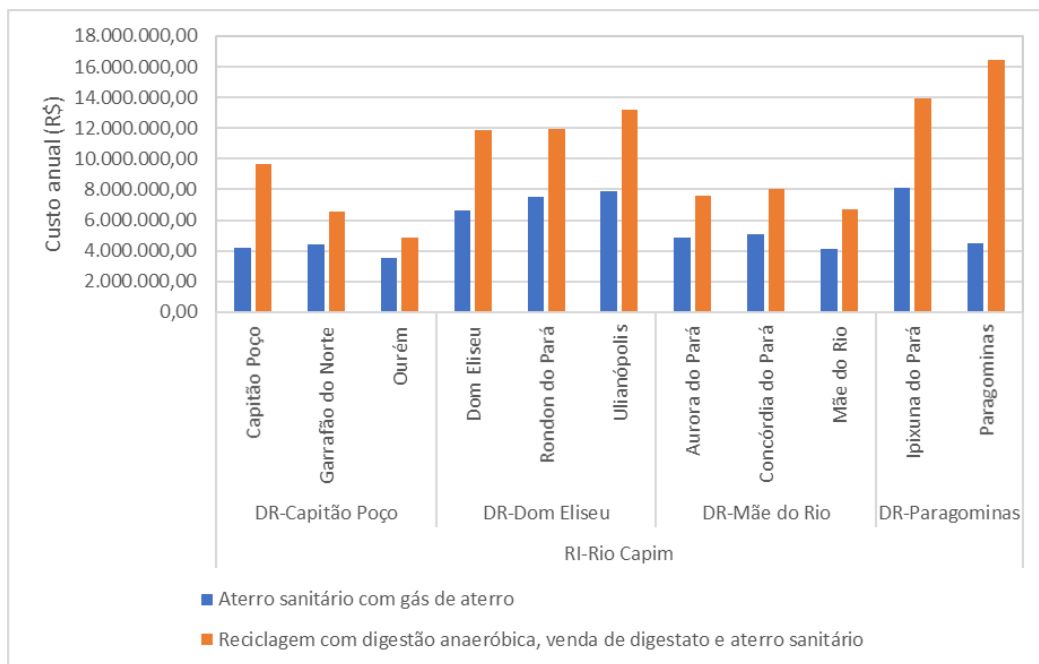


Figura 53 - Custo anual com TCP RI-Rio Capim

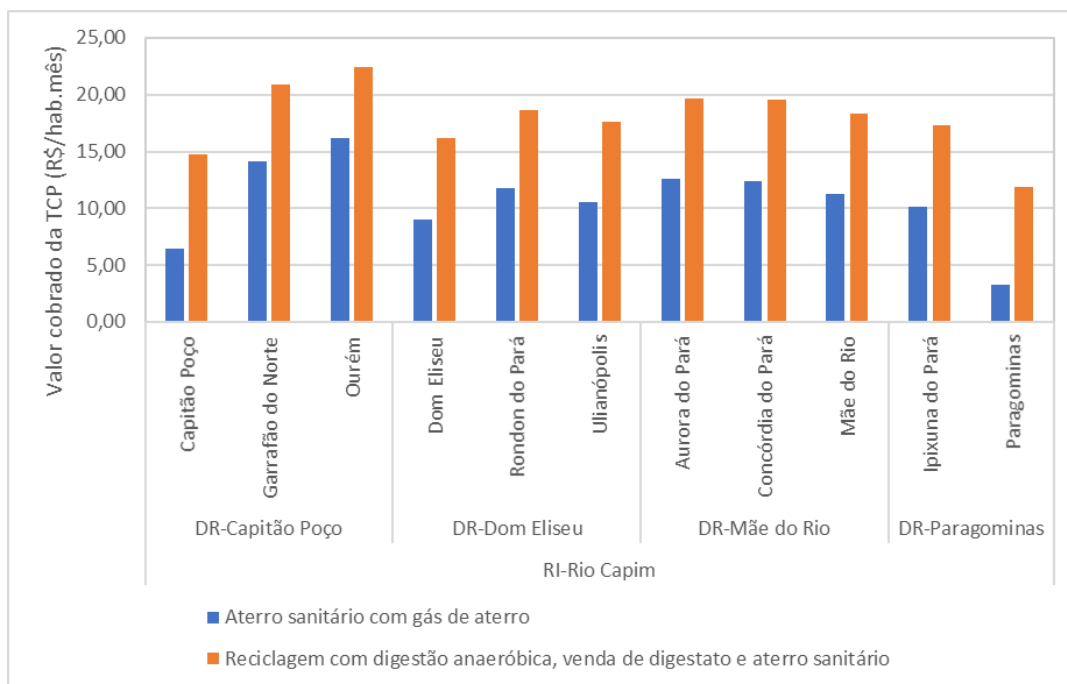


Figura 54 - Custo por habitante mês RI-Rio Capim

A região de integração do Rio Capim apresentou 4 possibilidade de destinações regionais, a DR-Capitão Poço, com custos anuais acima dos 4,2 milhões de reais por ano para o município de Capitão Poço, 4,4 milhões de reais por ano para o município de Garrafão do Norte, 3,5 milhões de reais por ano para o município de Ourém, os valores de TCP ficaram entre 16,21 e 22,48 reais por habitante mês para Ourém representando pouco mais de 3,7%, 14,15 e 20,88 reais por habitante mês para o município de Garrafão do Norte, representando entre 2,3 e 3,5 do percentual de renda mínima e por fim Capitão Poço com TCP máximo de 14,79 reais por habitante mês, representando 2,4% da renda mínima.

Para o DR-Dom Eliseu os custos anuais ficaram acima dos 7,8 milhões de reais por ano para o município de Ulianópolis, 7,5 milhões de reais por ano para o município de Rondon do Pará e 6,6 milhões de reais por ano para o município Dom Eliseu, os valores máximos de TCP ficaram em 18,64 reais por habitante mês para Rondon do Pará, representando pouco mais de 3%, 17,66 reais por habitante mês para o município de Ulianópolis, representando 2,9 % do percentual de renda mínima e por fim Dom Eliseu com TCP máximo de 16,14 reais por habitante mês, representando 2,6% da renda mínima.

Na DR-Mãe do Rio os custos anuais ficaram em no mínimo 5 milhões de reais por ano para o município de Concórdia do Pará com TCP de 12,37 reais por habitante mês representando 2% da renda mínima para o município de Aurora do Pará com gastos anuais em 4,8 milhões reais por ano com um TCP de 12,59 reais por habitante mês e 2% da renda mínima, e por fim o

município de Mãe do Rio, com custos anuais da ordem de 4,1 milhões de reais por ano, com um TCP de 11,28 reais por mês representando 1,9% da renda mínima dos municípios.

Por fim o DR-Paragominas, com os municípios de Paragominas com custos anuais entre de 4,5 e 16,5 milhões de reais por ano com TCP entre 3,23 e 11,84 reais por habitante mês representando entre 0,53 e 1,9% da renda mínima e o município de Ipixuna do Pará com valores anuais variando entre 8,1 e 14 milhões de reais por ano com um TCP de 10,1 e 17,29 reais por habitante mês e representando entre 1,67 e 2,8 % da renda mínima para o município de Ipixuna do Pará.

5.1.10. Região de integração - Tocantins

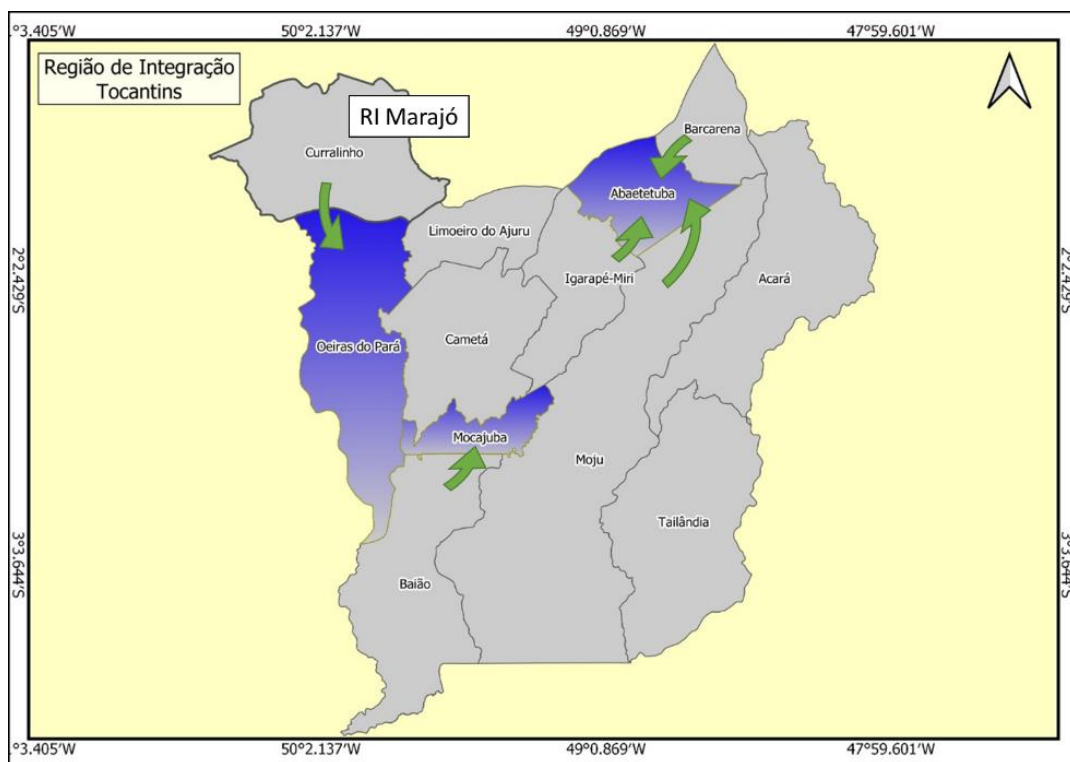


Figura 55 - Sugestão de destinação regional para RI-Tocantins

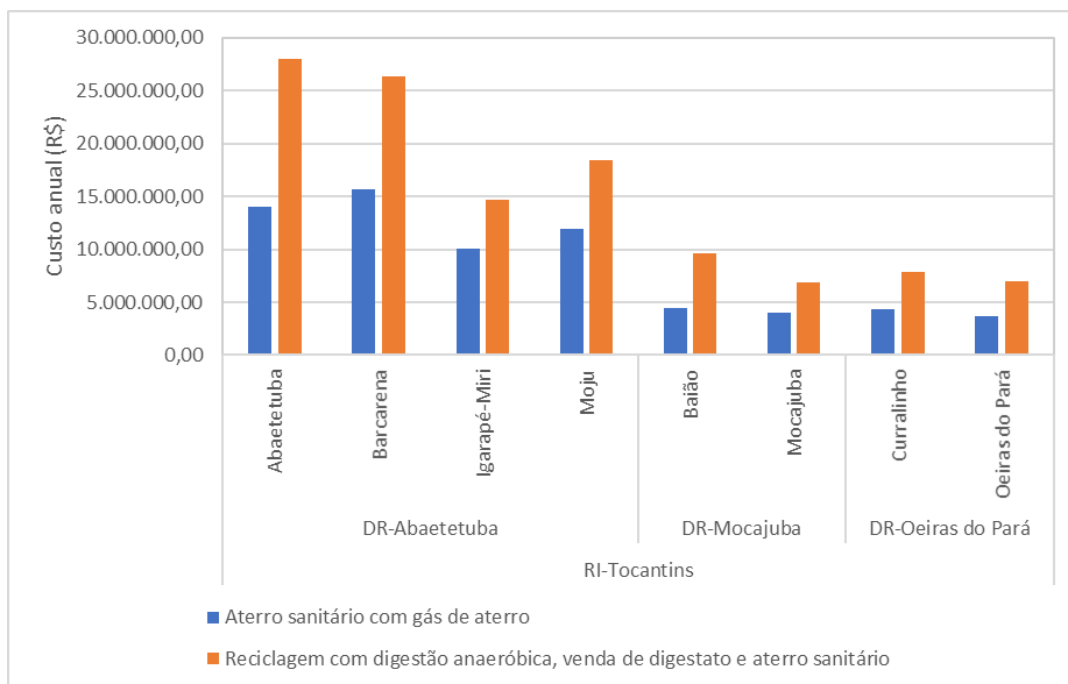


Figura 56 - Custo anual com TCP RI-Tocantins

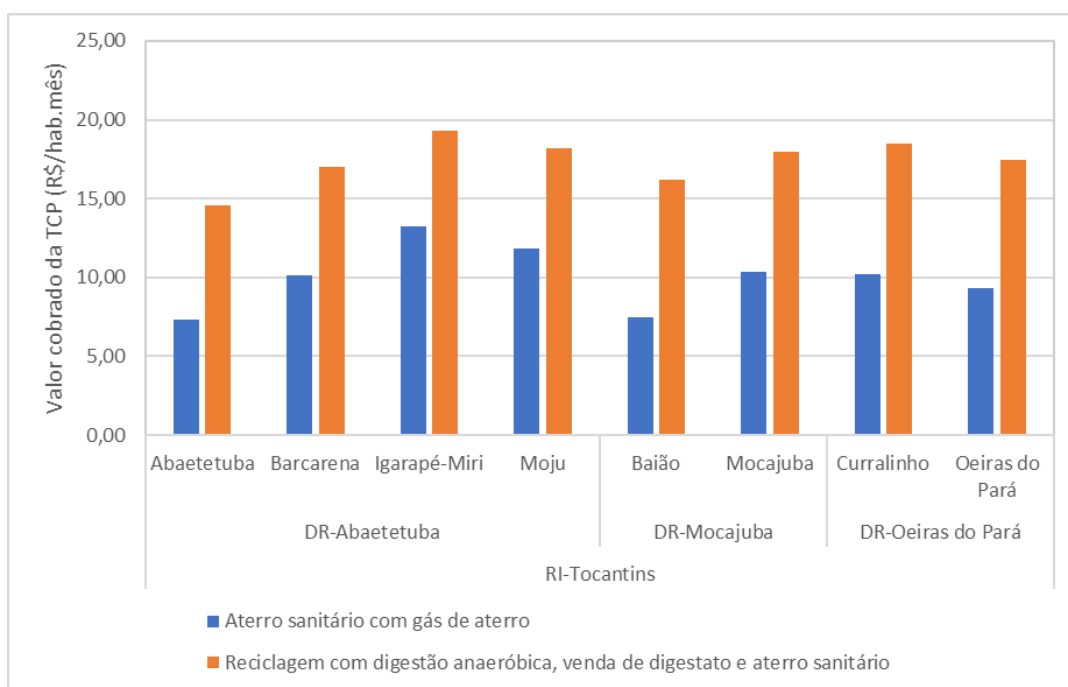


Figura 57 - Custo por habitante mês RI-Tocantins

E por fim a região de integração do Tocantins que apresentou 3 possibilidades de destinações regionais, a DR-Abaetetuba, com custos anuais de pouco mais de 26,3 milhões reais por ano para o município de Barcarena, 28 milhões para o município de Abaetetuba, 18,5 milhões para o município de Moju e 14,7 milhões reais por ano para o município de Igarapé-Miri, os valores de TCP ficaram com valores máximos de 19,34 reais por habitante mês para o município de Igarapé-Miri, representando 3,2%, do percentual de renda mínima do município,

para a destinação de gás de aterro com reciclagem, e com menor TCP em 13,26 reais por habitante mês representando 2,2 %.

Para o DR-Mocajuba, os custos anuais ficaram em no máximo 9,6 milhões e mínimo 4,4 milhões de reais por ano com TCP variando de 7,48 a 16,19 reais por habitante mês representando entre 1,2 e 2,7% da renda mínima para o município de Baião e o município de Mocajuba com valores entre 4 e 6,9 milhões reais por ano com um TCP entre 10,37 e 17,97 reais por habitante mês e renda mínima de município entre 1,7 e 3 %.

Na DR-Oeiras do Pará os custos anuais mínimos ficaram em 4,4 milhões de reais por ano para o município de Currálinho, e 3,7 milhões de reais por ano para o município de Oeiras do Pará, com valores máximos de TCP em 18,49 reais por habitante mês para Currálinho, representando 3 % da renda mínima do município e 9,31 reais por habitante mês para o município de Oeiras do Pará, representando 1,5 % do percentual de renda mínima, para a rota de aterro sanitário com gás de aterro.

5.2. Discussão

O percentual médio estimados dos gastos com a renda de meio salário mínimo da população foi em média um pouco acima dos 3 %, chegando a mais de 6% para os municípios com menos de 10.000 habitantes, quanto a distância, municípios entre 10.000 e 25.000 apresentaram percentuais próximos dos 4 %, de impacto na renda mensal da população.

Em praticamente todos os casos a destinação de reciclagem com digestão anaeróbica com vende de digestato se mostrou superior a destinação de aterro com gás de aterro. O grande destaque foi o município de Marabá na Região e Integração do Carajás que não apresentou necessidade de cobrança para a destinação de aterro sanitário com gás de aterro.

Conforme Citado no trabalho de Luz *et al.* (2015) a composição de RSU pode variar em função da renda da população, e do percentual da coleta de gases pode influenciar na geração de energia.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma breve revisão do estado da arte da tecnologia WTE aplicada na gestão de RSU e uma análise para o caso do Brasil, descrevendo o projeto WTE e as usinas já instaladas. Apresentando ao final uma análise econômica de seis rotas tecnológicas para disposição de resíduos sólidos por municípios com 30.000 a 250.000 habitantes no Brasil, são elas: rota 1 (aterro sanitário); rota 2 (captação de biogás de aterros e aterros sanitários); rota 3 (reciclagem, digestão anaeróbica e aterro); rota 4 (reciclagem, digestão anaeróbica com venda de digesto e aterro); rota 5 (reciclagem, incineração e aterro); rota 6 (reciclagem, digestão anaeróbica, incineração e aterro) e uma proposta de viabilidade de destinações finais considerando a agrupamento de municípios paraenses. Onde foi possível avaliar a sua viabilidade em termos de taxa de contribuição da população, do tempo de retorno máximo descontado e simples no horizonte do projeto, utilizando uma metodologia de análise de viabilidade econômica, com a implementação de um algoritmo de otimização para minimizar a taxa de contribuição da população.

Foi possível analisar a viabilidade financeira com foco na otimização de receitas em função da taxa de contribuição da população e da geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos.

Tanto o algoritmo elaborado em Python quanto o método de otimização utilizando (Trust-const) alcançaram seus propósitos, otimizando o valor mínimo dos indicadores econômicos, custos, receitas variáveis de dimensionamento que se fizeram necessários. Avaliando a sustentabilidade financeira das combinações de rotas de destinação para os RSU considerando os tempos de retorno descontado máximo do investimento;

Tanto o custo por tonelada de resíduo processado quanto o valor da taxa de contribuição da população, custo nivelado de eletricidade, taxa interna de retorno, tempo de retorno descontado e o custo mensal por habitante para rotas energéticas de destinação final de resíduos sólidos para pequenos municípios com até 250.000 habitantes e para o agrupamento dos municípios foram calculados de maneira satisfatória.

A utilização de algoritmos de otimização se mostrou fundamental, quando se necessita identificar valores de referência aplicados a processos de tomada de decisão, uma vez que sem eles é muito difícil estimar situações complexas reais com um mínimo de confiabilidade. Dentre os inúmeros algoritmos de otimização disponíveis o apresentado neste trabalho, baseado no

método de região de confiança se mostrou bastante confiável e estável para os cenários e análises, com valores sólidos e dentro dos parâmetros considerados.

A rota 2 de aterro e gás de aterro apresentou os melhores valores financeiros, dando uma Taxa interna de retorno de 11,61% para um tempo de retorno descontado de 15 anos, com uma taxa de contribuição da população de R\$ 4,56 por habitante/mês para municípios com 30.000 habitantes e ausência de cobrança para municípios com 60.000 habitantes ou mais, atingindo ganhos superiores a 100% e tempo de retorno de 1 ano para municípios com 250.000 habitantes. As rotas 4 e 3 com digestão anaeróbica, reciclagem e aterro com e sem venda de digestato vieram em seguida com valores econômicos máximos de taxa de contribuição da população de R\$ 17,77 por habitante/mês para um tempo de retorno de 20 anos e taxa interna de retorno de 11,61%. As vias 5 e 6 que utilizam incineração para geração de energia não foram atrativas para municípios com até 250.000 habitantes, pois apresentaram valores de taxa de contribuição da população acima dos estimados para a via 1 que foi utilizada como referência.

O percentual médio estimados dos gastos com a renda de meio salário mínimo da população paraense foi um pouco acima dos 3 %, chegando a mais de 6% para os municípios com menos de 10.000 habitantes, e 4% para municípios entre 10.000 e 25.000.

É inegável que a conversão de resíduos sólidos urbanos em energia é o caminho para benefícios sociais, ambientais e econômicos, mas essa opção está cada vez mais cara no Brasil, causando prejuízos em diversas áreas. Estudar soluções economicamente viáveis que possam ser aplicadas nos municípios brasileiros é um desafio tecnológico, político e econômico.

O agrupamento de municípios próximos apresentou melhores retornos do ponto de vista econômico, social e ambiental, pois é muito mais econômico construir uma usina maior e estações de transbordo menores, com viagens e caminhões completos, ao invés construir várias pequenas usinas com maiores custos de tratamento.

Pelos cálculos realizados, quanto a viabilidade de rotas de geração de energia de resíduos sólidos urbanos aplicado ao agrupamento de municípios paraenses, considerando principalmente destinações finais envolvendo digestão anaeróbica e gás de aterro, os valores apresentaram taxa de contribuição da população inferiores aos gastos com aterro sanitário somente, que hoje é a destinação mais difundida em nosso país, entretanto este modelo de gestão que não deveria ser mais o predominante, uma vez que foi comprovado que existem outras formas de valorização dos resíduos para ser aplicadas, mesmo em pequenas escalas. Espera-se que o algoritmo desenvolvido se torne futuramente um simulador público para resolver este tipo de problema.

Que este trabalho sirva não somente como um indicativo para governantes e empresários, espera-se que os mesmos optem por valorizar seus resíduos, devolvendo cadeias produtivas locais, ou utilizando como insumo energético. Que o modelo de otimização desenvolvido possa ser utilizado por tomadores de decisão, estimando novos valores de indicadores econômicos e taxas conforme seja apresentado o cenário, servindo de estímulo para se optar por estas tecnologias tão benéficas a população e ao meio ambiente.

Espera-se com este trabalho não só demonstrar o potencial energético que está sendo desperdiçado, mas tornar a conversão de RSU em energia, real no Brasil. É urgente a mudança paradigmática de como os RSU são tratados, é necessário um olhar de responsabilidade no seu descarte e oportunidades para a geração de energia.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Explorar de maneira mais efetiva as variáveis presentes no programa, principalmente variando o comportamento da geração dos gases, indicadores econômicos, percentuais dos produtos em especial dos recicláveis e os custos de logística para a venda destes recicláveis.

Realizar uma análise minuciosa acerca da influência da composição do lixo em função da renda da população, em especial no estado do Pará

Realizar uma análise que apresente não só a viabilidade financeira, mas também ganhos sociais e ambientais.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-SHAFY, H. I.; MANSOUR, M. S. M. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 27, n. 4, p. 1275–1290, 2018. DOI 10.1016/j.ejpe.2018.07.003. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>.
- ABRELPE, A. B. de E. de L. P. e R. E. Estimativas Dos Custos Para Viabilizar a Universalização Da Destinação Adequada De Resíduos Sólidos No Brasil. , p. 91, 2015. Available at: <https://abrelpe.org.br/estimativa-dos-custos-para-viabilizar-a-universalizacao-da-destinacao-adequada-de-residuos-solidos-no-brasil/>.
- ABREN. Contribuição para Consulta Pública Nº 025/2019. , p. 28, 2019. Available at: https://www.aneel.gov.br/consultas-publicas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_participacaopublica_WAR.
- ABUSHAMMALA, M. F. M.; AHMAD BASRI, N. E.; BASRI, H.; EL-SHAFIE, A. H.; KADHUM, A. A. H. Regional landfills methane emission inventory in Malaysia. **Waste Management and Research**, v. 29, n. 8, p. 863–873, 2011. <https://doi.org/10.1177/0734242X10382064>.
- AGHAJANI MIR, M.; TAHEREI GHAZVINEI, P.; SULAIMAN, N. M. N.; BASRI, N. E. A.; SAHERI, S.; MAHMOOD, N. Z.; JAHAN, A.; BEGUM, R. A.; AGHAMOHAMMADI, N. Application of TOPSIS and VIKOR improved versions in a multi criteria decision analysis to develop an optimized municipal solid waste management model. **Journal of Environmental Management**, v. 166, p. 109–115, 2016. DOI 10.1016/j.jenvman.2015.09.028. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.09.028>.
- AGUILAR-VIRGEN, Q.; TABOADA-GONZÁLEZ, P.; OJEDA-BENÍTEZ, S.; CRUZ-SOTELO, S. Power generation with biogas from municipal solid waste: Prediction of gas generation with in situ parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 412–419, 2014. DOI 10.1016/j.rser.2013.10.014. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.014>.
- ALFAIA, R. G. de S. M.; COSTA, A. M.; CAMPOS, J. C. Municipal solid waste in Brazil: A review. **Waste Management and Research**, v. 35, n. 12, p. 1195–1209, 2017. <https://doi.org/10.1177/0734242X17735375>.
- ALVES, H. J.; BLEY JUNIOR, C.; NIKLEVICZ, R. R.; FRIGO, E. P.; FRIGO, M. S.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 13, p. 5215–5225, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.057>.
- ALZATE, S.; RESTREPO-CUESTAS, B.; JARAMILLO-DUQUE, Á. Municipal solid waste as a source of electric power generation in Colombia: A techno-economic evaluation under different scenarios. **Resources**, v. 8, n. 1, p. 1–16, 2019. <https://doi.org/10.3390/resources8010051>.

- AMINI, H. R.; REINHART, D. R. Regional prediction of long-term landfill gas to energy potential. **Waste Management**, v. 31, n. 9–10, p. 2020–2026, 2011. DOI 10.1016/j.wasman.2011.05.010. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.010>.
- ANEEL. Aprovado edital do leilão A-6 deste ano, Certame será realizado dia 18/10 em São Paulo. **Geração**, v. 2020, p. 7–9, 2019. Available at: https://www.aneel.gov.br/web/guest/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/id/19223109.
- ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012. , p. 13, 2012. Available at: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>.
- ANEEL. Resolução Normativa nº 687 de 2015 da ANEEL. **Aneel**, , p. 24, 2015. Available at: <https://microinversor.com.br/resolucao-normativa-687-aneel/?v=19d3326f3137>.
- ANEEL, A. N. de E. E. Sistema de Informações de Geração da ANEEL SIGA. 2022. Available at: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>.
- ANGHINOLFI, D.; PAOLUCCI, M.; ROBBA, M.; TARAMASSO, A. C. A dynamic optimization model for solid waste recycling. **Waste Management**, v. 33, n. 2, p. 287–296, 2013. DOI 10.1016/j.wasman.2012.10.006. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.006>.
- ARABKOOHSAR, A.; SADI, M.; BEHZADI, A.; RAHBARI, H. R. Techno-economic analysis and multiobjective optimization of a novel proposal for addressing summer-supply challenges of district heating systems. **Energy Conversion and Management**, v. 236, n. March, p. 113985, 2021. DOI 10.1016/j.enconman.2021.113985. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113985>.
- AYODELE, T. R.; OGUNJUYIGBE, A. S. O.; ALAO, M. A. Economic and environmental assessment of electricity generation using biogas from organic fraction of municipal solid waste for the city of Ibadan, Nigeria. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, p. 718–735, 2018. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.08.282. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.282>.
- AZIZ, H. A.; OTHMAN, O. M.; ABU AMR, S. S. The performance of Electro-Fenton oxidation in the removal of coliform bacteria from landfill leachate. **Waste Management**, v. 33, n. 2, p. 396–400, 2013. DOI 10.1016/j.wasman.2012.10.016. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.016>.
- AZNAR, M. P.; CABALLERO, M. A.; SANCHO, J. A.; FRANCÉS, E. Plastic waste elimination by co-gasification with coal and biomass in fluidized bed with air in pilot plant. **Fuel Processing Technology**, v. 87, n. 5, p. 409–420, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.09.006>.
- BABALOLA, F. U.; ADELOPO, ABDULGANIYU, O.; AIYEPOLA, BOLUWATITO, M.; NUBI, AFOLASADE, T. Cost minimization and operation optimization model for strategic waste management decision plans: A case study. **African Journal of**

- Environmental Science and Technology**, v. 15, n. 2, p. 98–108, 2021. <https://doi.org/10.5897/ajest2020.2908>.
- BAEYENS, J.; BREMS, A.; DEWIL, R. Recovery and recycling of post-consumer waste materials. Part 2. Target wastes (glass beverage bottles, plastics, scrap metal and steel cans, end-of-life tyres, batteries and household hazardous waste). **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 3, n. 4, p. 232–245, 2010. <https://doi.org/10.1080/19397038.2010.507885>.
- BAGHERI, M.; ESFILAR, R.; GOLCHI, M. S.; KENNEDY, C. A. A comparative data mining approach for the prediction of energy recovery potential from various municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 116, n. September, p. 109423, 2019. DOI 10.1016/j.rser.2019.109423. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109423>.
- BAJIĆ, B. Z.; DODIĆ, S. N.; VUČUROVIĆ, D. G.; DODIĆ, J. M.; GRAHOVAC, J. A. Waste-to-energy status in Serbia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 1437–1444, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.079>.
- BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T.; MOURA, J. S.; PIERONI, M. F.; VIEIRA, F. C.; LAGE, L. R.; MOHR, G. S.; BASTOS, A. S. Design and implementation study of a Permanent Selective Collection Program (PSCP) on a University campus in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 80, n. 1, p. 97–106, 2013. DOI 10.1016/j.resconrec.2013.09.005. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.09.005>.
- BERNSTAD SARAIVA, A.; SOUZA, R. G.; VALLE, R. A. B. Comparative lifecycle assessment of alternatives for waste management in Rio de Janeiro – Investigating the influence of an attributional or consequential approach. **Waste Management**, v. 68, p. 701–710, 2017. DOI 10.1016/j.wasman.2017.07.002. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.002>.
- BRASIL. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). **Ministério do Desenvolvimento Regional, Secretaria Nacional de Saneamento**, 2020a. Available at: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-residuos-solidos/diagnostico-do-manejo-de-residuos-solidos-urbanos-2019>.
- BRASIL. Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). , p. 1–19, 2010. Available at: www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm.
- BRASIL. LEI N° 14.026, DE 15 DE JULHO DE 2020. , p. 1–26, 2020b. Available at: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421>.
- BRENCORP CONSULTORIA, M. A. e E. L. Relatório 2 – Proposta de Regionalização da Gestão dos Resíduos Sólidos no Estado do Pará. n. 81, p. 288, 2013. .
- BROITMAN, D.; AYALON, O.; KAN, I. One size fits all? An assessment tool for solid waste management at local and national levels. **Waste Management**, v. 32, n. 10, p. 1979–1988, 2012. DOI 10.1016/j.wasman.2012.05.023. Available at:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.023>.

BRUNNER, P. H.; RECHBERGER, H. Waste to energy - key element for sustainable waste management. **Waste Management**, v. 37, p. 3–12, 2015. DOI 10.1016/j.wasman.2014.02.003. Available at: k.

BYRD, R. H.; GILBERT, J. C.; NOCEDAL, J. A trust region method based on interior point techniques for nonlinear programming. **Mathematical Programming, Series B**, v. 89, n. 1, p. 149–185, 2000. <https://doi.org/10.1007/PL00011391>.

CAIADO, N.; GUARNIERI, P.; XAVIER, L. H.; DE LORENA DINIZ CHAVES, G. A characterization of the Brazilian market of reverse logistic credits (RLC) and an analogy with the existing carbon credit market. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 118, p. 47–59, 2017. DOI 10.1016/j.resconrec.2016.11.021. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.11.021>.

CAMPOS, H. K. T. Recycling in Brazil: Challenges and prospects. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 85, p. 130–138, 2014. DOI 10.1016/j.resconrec.2013.10.017. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.017>.

CARNEIRO, M. L. N. M.; GOMES, M. S. P. Energy, exergy, environmental and economic analysis of hybrid waste-to-energy plants. **Energy Conversion and Management**, v. 179, n. November 2018, p. 397–417, 2019. DOI 10.1016/j.enconman.2018.10.007. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.007>.

CEMPRE. ARTIGOS E PUBLICAÇÕES. 2020a. Available at: <http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/10/composto-urbano>.

CEMPRE. CEMPRE INFORMA NÚMERO 157. 2020b. Available at: <http://cempre.org.br/cempre-informa/id/115/preco-dos-materiais-reciclaveis>.

CHALLCHAROENWATTANA, A.; PHARINO, C. Wishing to finance a recycling program? Willingness-to-pay study for enhancing municipal solid waste recycling in urban settlements in Thailand. **Habitat International**, v. 51, p. 23–30, 2016. DOI 10.1016/j.habitatint.2015.10.008. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.10.008>.

CHEN, D.; CHRISTENSEN, T. H. Life-cycle assessment (EASEWASTE) of two municipal solid waste incineration technologies in China. **Waste Management and Research**, v. 28, n. 6, p. 508–519, 2010. <https://doi.org/10.1177/0734242X10361761>.

CHEN, H.; LI, J.; LIU, J.; LI, T.; XU, G.; LIU, W. Thermodynamic and economic evaluation of a novel waste-to-energy design incorporating anaerobic digestion and incineration. **Energy Conversion and Management**, v. 252, p. 115083, 2022. DOI 10.1016/J.ENCONMAN.2021.115083. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890421012590>.

CHENG, H.; HU, Y. Curbing dioxin emissions from municipal solid waste incineration in China: Re-thinking about management policies and practices. **Environmental Pollution**, v. 158, n. 9, p. 2809–2814, 2010. DOI 10.1016/j.envpol.2010.06.014. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2010.06.014>.

- CHOI, H. "Henry; KIM, S.; CHOI, S. **Trust-region learning for ICA**. [S. l.: s. n.], 2004. v. 1, . <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2004.1379867>.
- CIDADE, F. C.; OLIVEIRA, J. A. de. Da Coleta À Comercialização: a Cadeia Produtiva Reversa De Pós-Consumo Numa Cidade Amazônica / From the Collecting To Commercialization: the Reverse Productive Chain of Post-Consumer in an Amazon City. **Geo UERJ**, v. 0, n. 31, p. 474–503, 2017. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2017.15675>.
- COBAN, A.; ERTIS, I. F.; CAVDAROGLU, N. A. Municipal solid waste management via multi-criteria decision making methods: A case study in Istanbul, Turkey. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 159–167, 2018. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.01.130. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.130>.
- COLVERO, D. A.; RAMALHO, J.; GOMES, A. P. D.; MATOS, M. A. A. de; TARELHO, L. A. da C. Economic analysis of a shared municipal solid waste management facility in a metropolitan region. **Waste Management**, v. 102, n. August 2014, p. 823–837, 2020. DOI 10.1016/j.wasman.2019.11.033. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.033>.
- CONN, A. R.; GOULD, N. I. M.; TOINT, P. L. **Trust Region Methods**. [S. l.]: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000. DOI 10.1137/1.9780898719857. Available at: <http://epubs.siam.org/doi/book/10.1137/1.9780898719857>.
- CORIGLIANO, O.; DE LORENZO, G.; FRAGIACOMO, P. Techno-energy-economic sensitivity analysis of hybrid system Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine. **AIMS Energy**, v. 9, n. 5, p. 934–990, 2021. <https://doi.org/10.3934/energy.2021044>.
- CPHEEO. Manual on Municipal Solid Waste Management. New Delhi, 2000. .
- CURRY, N.; PILLAY, P. Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. **Renewable Energy**, v. 41, p. 200–209, 2012. DOI 10.1016/j.renene.2011.10.019. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.10.019>.
- CURTIS, F. E.; SCHENK, O.; ACHTER, A. W. " Frank E. Curtis † , Olaf Schenk ‡ , v. 32, n. 6, p. 3447–3475, 2010. .
- DA SILVA ALCÂNTARA FRATTA, K. D.; DE CAMPOS LEITE TONELI, J. T.; ANTONIO, G. C. Diagnosis of the management of solid urban waste of the municipalities of ABC Paulista of Brasil through the application of sustainability indicators. **Waste Management**, v. 85, p. 11–17, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.001>.
- DA SILVA, E. R.; TONELI, J. T. de C. L.; PALACIOS-BERECHE, R. Estimation of municipal solid waste energy recovery potential using mathematical models of anaerobic biodigestion and incineration. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 347–357, 2019. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019179023>.
- DAMODARAN, A. Estimation and Implications – The 2019 Edition Updated : April 2019 Aswath Damodaran Stern School of Business. n. April, 2019. Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3378246.

- DE MORAIS LIMA, P.; OLIVO, F.; PAULO, P. L.; SCHALCH, V.; CIMPAN, C. Life Cycle Assessment of prospective MSW management based on integrated management planning in Campo Grande, Brazil. **Waste Management**, v. 90, p. 59–71, 2019. DOI 10.1016/j.wasman.2019.04.035. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.035>.
- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources: an introduction**. [S. l.: s. n.], 2011.
- DI TRAPANI, D.; VOLPE, M.; DI BELLA, G.; MESSINEO, A.; VOLPE, R.; VIVIANI, G. Assessing Methane Emission and Economic Viability of Energy Exploitation in a Typical Sicilian Municipal Solid Waste Landfill. **Waste and Biomass Valorization**, v. 10, n. 10, p. 3173–3184, 2019. DOI 10.1007/s12649-018-0321-y. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-018-0321-y>.
- DOU, D. O. D. U. LEI N° 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022. , p. 1–11, 2022. .
- ECOPROG. Waste to Energy 2021 / 2022. 2021. .
- EHRIG, H. Quality and quantity of sanitary landfill leachate. **Waste Management & Research**, v. 1, n. 1, p. 53–68, 1983. [https://doi.org/10.1016/0734-242x\(83\)90024-1](https://doi.org/10.1016/0734-242x(83)90024-1).
- ELSHABOURY, N.; ABDELKADER, E. M.; ALFALAH, G.; AL-SAKKAF, A. Predictive analysis of municipal solid waste generation using an optimized neural network model. **Processes**, v. 9, n. 11, 2021. <https://doi.org/10.3390/pr9112045>.
- EPE, E. de P. E. Estudo sobre a Economicidade do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro para Produção de Biometano. **Política Agrícola**, v. XV, n. 3, p. 119, 2018. Available at: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-309/NT Biometano de Aterro vf 0192018.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-309/NT%20Biometano%20de%20Aterro%20vf%200192018.pdf).
- EQUATORIAL, E. Valor de tarifas e serviços. 2022. Available at: <https://pa.equatorialenergia.com.br/informacoes-gerais/valor-de-tarifas-e-servicos/>.
- FAN, W.; PERROS, H. A novel trust management framework for multi-cloud environments based on trust service providers. **Knowledge-Based Systems**, v. 70, n. August, p. 392–406, 2014. DOI 10.1016/j.knosys.2014.07.018. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.knosys.2014.07.018>.
- FAPESPA, F. A. de A. a E. e P. Regiões de Integração do Estado do Pará. 2016. Available at: [https://www.fapespa.pa.gov.br/sistemas/anuario2017/mapas/territorio/ter2_regioes_d e_integracao_do_para.png](https://www.fapespa.pa.gov.br/sistemas/anuario2017/mapas/territorio/ter2_regioes_d_e_integracao_do_para.png).
- FEI, F.; WEN, Z.; HUANG, S.; DE CLERCQ, D. Mechanical biological treatment of municipal solid waste: Energy efficiency, environmental impact and economic feasibility analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 731–739, 2018. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.01.060. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.060>.
- FERDAN, T.; ŠOMPLÁK, R.; ZAVÍRALOVÁ, L.; PAVLAS, M.; FRÝBA, L. A waste-

- to-energy project: A complex approach towards the assessment of investment risks. **Applied Thermal Engineering**, v. 89, p. 1127–1136, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.005>.
- FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, J. M.; GRINDLAY, A. L.; SERRANO-BERNARDO, F.; RODRÍGUEZ-ROJAS, M. I.; ZAMORANO, M. Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities. **Waste Management**, v. 67, p. 360–374, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.003>.
- FERNANDO, R. L. S. Solid waste management of local governments in the Western Province of Sri Lanka: An implementation analysis. **Waste Management**, v. 84, p. 194–203, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.030>.
- GRS-UFPE. Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. , p. 188, 2014. Available at: http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivo_s/produtos/download/aep_fep/chamada_publica_residuos_solidos_Relat_Final.pdf.
- HADIDI, L. A.; OMER, M. M. A financial feasibility model of gasification and anaerobic digestion waste-to-energy (WTE) plants in Saudi Arabia. **Waste Management**, v. 59, p. 90–101, 2017. DOI 10.1016/j.wasman.2016.09.030. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.030>.
- HAMEED, Z.; ASLAM, M.; KHAN, Z.; MAQSOOD, K.; ATABANI, A. E.; GHAURI, M.; KHURRAM, M. S.; REHAN, M.; NIZAMI, A. S. Gasification of municipal solid waste blends with biomass for energy production and resources recovery: Current status, hybrid technologies and innovative prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 136, n. September 2020, p. 110375, 2021. DOI 10.1016/j.rser.2020.110375. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110375>.
- HASAN, M. M.; RASUL, M. G.; KHAN, M. M. K.; ASHWATH, N.; JAHIRUL, M. I. Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 145, n. September 2020, p. 111073, 2021. DOI 10.1016/j.rser.2021.111073. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111073>.
- HILKIAH IGONI, A.; AYOTAHMUNO, M. J.; EZE, C. L.; OGAJI, S. O. T.; PROBERT, S. D. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. **Applied Energy**, v. 85, n. 6, p. 430–438, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.07.013>.
- IBÁÑEZ-FORÉS, V.; COUTINHO-NÓBREGA, C.; BOVEA, M. D.; DE MELLO-SILVA, C.; LESSA-FEITOSA-VIRGOLINO, J. Influence of implementing selective collection on municipal waste management systems in developing countries: A Brazilian case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 134, n. September 2017, p. 100–111, 2018. DOI 10.1016/j.resconrec.2017.12.027. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.027>.
- IBGE, I. B. de G. e E. Indicadores Estado do Pará. 2022. Available at:

<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sintese/pa?indicadores=29171,60037,47001,30255>.

- IONESCU, G.; RADA, E. C.; RAGAZZI, M.; MĂRCULESCU, C.; BADEA, A.; APOSTOL, T. Integrated municipal solid waste scenario model using advanced pretreatment and waste to energy processes. **Energy Conversion and Management**, v. 76, p. 1083–1092, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.049>.
- IPCC, I. P. on C. C. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Japan: IGES, 2006. Available at: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.
- ISWA, I. S. W. A. **Waste-to-energy State-of-the-art-report**. [S. l.: s. n.], 2012.
- ITEC, R. S. U. TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. 2011. Available at: <https://sites.google.com/a/esjgf.info/trsu/home/como-trata-las/incineracao>.
- JOHARI, A.; AHMED, S. I.; HASHIM, H.; ALKALI, H.; RAMLI, M. Economic and environmental benefits of landfill gas from municipal solid waste in Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 2907–2912, 2012. DOI 10.1016/j.rser.2012.02.005. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.005>.
- KALYANI, K. A.; PANDEY, K. K. Waste to energy status in India: A short review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 113–120, 2014. DOI 10.1016/j.rser.2013.11.020. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.020>.
- KAUR, A.; BHARTI, R.; SHARMA, R. Municipal solid waste as a source of energy. **Materials Today: Proceedings**, n. xxxx, 2021. DOI 10.1016/j.matpr.2021.04.286. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.286>.
- KHAN, E. U.; MARTIN, A. R. Review of biogas digester technology in rural Bangladesh. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 247–259, 2016. DOI 10.1016/j.rser.2016.04.044. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.044>.
- KHATIB, I. A. Municipal solid waste management in developing countries: Future challenges and possible opportunities. **Journal of Green Engineering**, v. 10, n. 10, p. 8788–8797, 2011. <https://doi.org/10.5772/16438>.
- KINOBE, J. R.; BOSONA, T.; GEBRESENBET, G.; NIWAGABA, C. B.; VINNERÅS, B. Optimization of waste collection and disposal in Kampala city. **Habitat International**, v. 49, p. 126–137, 2015. DOI 10.1016/j.habitatint.2015.05.025. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.05.025>.
- KLEMETSDAL, Ø. S.; MØYNER, O.; LIE, K. A. Robust nonlinear Newton solver with adaptive interface-localized trust regions. **SPE Journal**, v. 24, n. 4, p. 1576–1594, 2019. <https://doi.org/10.2118/195682-PA>.
- KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 69, p. 407–422, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>.
- KWON, S.; IM, S. kyun. Feasibility of non-thermal plasma gasification for a waste-to-energy power plant. **Energy Conversion and Management**, v. 251, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114978>.

- LANER, D.; CREST, M.; SCHARFF, H.; MORRIS, J. W. F.; BARLAZ, M. A. A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills. **Waste Management**, v. 32, n. 3, p. 498–512, 2012. DOI 10.1016/j.wasman.2011.11.010. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.010>.
- LEME, M. M. V.; ROCHA, M. H.; LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; LOPES, B. M.; FERREIRA, C. H. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 87, p. 8–20, 2014. DOI 10.1016/j.resconrec.2014.03.003. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.003>.
- LI, Q.; FARAMARZI, A.; ZHANG, S.; WANG, Y.; HU, X.; GHOLIZADEH, M. Progress in catalytic pyrolysis of municipal solid waste. **Energy Conversion and Management**, v. 226, n. October, p. 113525, 2020. DOI 10.1016/j.enconman.2020.113525. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113525>.
- LINO, F. A. de M. Consumo de energia no transporte da coleta seletiva de resíduo sólido domiciliar no município de Campinas (SP). **Faculdade de Engenharia Mecânica**, p. 135, 2009. Available at: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264906>.
- LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Evaluation of the treatment of municipal solid waste as renewable energy resource in Campinas, Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 29, n. June, p. 19–25, 2018. DOI 10.1016/j.seta.2018.06.011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.06.011>.
- LMOP. United States Environmental Protection Agency Landfill Methane Outreach Program. 2021. .
- LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E. A. Evaluation of the environmental sustainability of different waste-to-energy plant configurations. **Waste Management**, v. 73, p. 232–246, 2018. DOI 10.1016/j.wasman.2017.07.006. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.006>.
- LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; CORTI, A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. **Waste Management**, v. 37, p. 26–44, 2015. DOI 10.1016/j.wasman.2014.11.010. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010>.
- LOUREIRO, S. M.; ROVERE, E. L. L.; MAHLER, C. F. Analysis of potential for reducing emissions of greenhouse gases in municipal solid waste in Brazil, in the state and city of Rio de Janeiro. **Waste Management**, v. 33, n. 5, p. 1302–1312, 2013. DOI 10.1016/j.wasman.2013.01.024. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.024>.
- LUZ, F. C.; ROCHA, M. H.; LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; ANDRADE, R. V.; LEME, M. M. V.; DEL OLMO, O. A. Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil. **Energy Conversion and Management**, v. 103, p. 321–337, 2015. DOI 10.1016/j.enconman.2015.06.074. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.074>.

- MABALANE, P. N.; OBOIRIEN, B. O.; SADIKU, E. R.; MASUKUME, M. A Techno-economic Analysis of Anaerobic Digestion and Gasification Hybrid System: Energy Recovery from Municipal Solid Waste in South Africa. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, n. 3, p. 1167–1184, 2021. DOI 10.1007/s12649-020-01043-z. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01043-z>.
- MADANI, K.; DARCH, G.; PARRA, F.; WORKMAN, M. Using game theory to address modern resource management problems. **Grantham Institute, Imperial College London**, n. 2, p. 6, 2015. DOI 10.13140/RG.2.1.4283.9524. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/282253065>.
- MAIER, S.; OLIVEIRA, L. B. Economic feasibility of energy recovery from solid waste in the light of Brazil's waste policy: The case of Rio de Janeiro. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 35, p. 484–498, 2014. DOI 10.1016/j.rser.2014.04.025. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.025>.
- MAKARICHI, L.; JUTIDAMRONGPHAN, W.; TECHATO, K. anan. The evolution of waste-to-energy incineration: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, n. May 2017, p. 812–821, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.088>.
- MASTELLONE, M. L. **Thermal treatments of plastic wastes by means of fluidized bed reactors**. 1999. Second University of Naples, Italy, 1999.
- MAVROTAS, G.; SKOULAXINO, S.; GAKIS, N.; KATSOUROS, V.; GEORGOPOULOU, E. A multi-objective programming model for assessment the GHG emissions in MSW management. **Waste Management**, v. 33, n. 9, p. 1934–1949, 2013. DOI 10.1016/j.wasman.2013.04.012. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.04.012>.
- MAYER, C.; BREUN, P.; SCHULTMANN, F. Considering risks in early stage investment planning for emission abatement technologies in large combustion plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 133–144, 2017. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.05.089. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.089>.
- MEDINA JIMENEZ, A. C.; NORDI, G. H.; PALACIOS BERECHÉ, M. C.; BERECHÉ, R. P.; GALLEGO, A. G.; NEBRA, S. A. Evaluation of two different alternatives of energy recovery from municipal solid waste in Brazil. **Waste Management and Research**, v. 35, n. 11, p. 1137–1148, 2017. <https://doi.org/10.1177/0734242X17728123>.
- MEIRA DE SOUSA DUTRA, R.; HARUE YAMANE, L.; RIBEIRO SIMAN, R. Influence of the expansion of the selective collection in the sorting infrastructure of waste pickers' organizations: A case study of 16 Brazilian cities. **Waste Management**, v. 77, n. 2018, p. 50–58, 2018. DOI 10.1016/j.wasman.2018.05.009. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.009>.
- MILUTINOVIĆ, B.; STEFANOVIĆ, G.; ĐEKIĆ, P. S.; MIJAILOVIĆ, I.; TOMIĆ, M. Environmental assessment of waste management scenarios with energy recovery using life cycle assessment and multi-criteria analysis. **Energy**, v. 137, p. 917–926, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.167>.

- MINOGLU, M.; KOMILIS, D. Optimizing the treatment and disposal of municipal solid wastes using mathematical programming - A case study in a Greek region. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 80, n. 1, p. 46–57, 2013. DOI 10.1016/j.resconrec.2013.08.004. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.08.004>.
- MOHAMMADIAN BISHEH, H.; RAHIMI KIAN, A.; SEYYED ESFAHANI, M. M. Solving environmental/economic power dispatch problem by a trust region based augmented Lagrangian method. **Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering**, v. 8, n. 2, p. 177–187, 2012. .
- MONLAU, F.; SAMBUSITI, C.; FICARA, E.; ABOULKAS, A.; BARAKAT, A.; CARRÈRE, H. New opportunities for agricultural digestate valorization: Current situation and perspectives. **Energy and Environmental Science**, v. 8, n. 9, p. 2600–2621, 2015. <https://doi.org/10.1039/c5ee01633a>.
- MORF, L. S.; GLOOR, R.; HAAG, O.; HAUPT, M.; SKUTAN, S.; LORENZO, F. Di; BÖNI, D. Precious metals and rare earth elements in municipal solid waste - Sources and fate in a Swiss incineration plant. **Waste Management**, v. 33, n. 3, p. 634–644, 2013. DOI 10.1016/j.wasman.2012.09.010. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.010>.
- MÜLLER, G. T.; GIACOBBO, A.; DOS SANTOS CHIARAMONTE, E. A.; RODRIGUES, M. A. S.; MENEGUZZI, A.; BERNARDES, A. M. The effect of sanitary landfill leachate aging on the biological treatment and assessment of photoelectrooxidation as a pre-treatment process. **Waste Management**, v. 36, p. 177–183, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.024>.
- MUSTAFA, A. M.; POULSEN, T. G.; SHENG, K. Fungal pretreatment of rice straw with *Pleurotus ostreatus* and *Trichoderma reesei* to enhance methane production under solid-state anaerobic digestion. **Applied Energy**, v. 180, p. 661–671, 2016. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.07.135. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.135>.
- NETO, C. **Elaboração e avaliação de projetos de investimento**. [S. l.]: Elsevier, 2009.
- NIXON, J. D.; DEY, P. K.; GHOSH, S. K.; DAVIES, P. A. Evaluation of options for energy recovery from municipal solid waste in India using the hierarchical analytical network process. **Energy**, v. 59, p. 215–223, 2013. DOI 10.1016/j.energy.2013.06.052. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.052>.
- NIZAMI, A.-S. Anaerobic digestion process products and applications. 2012. Available at: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/50688741/Anaerobic_digestion__process__products_and_applications.pdf?1480746206=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAnaerobic_Digestion_Processes_Products_a.pdf&Expires=1633464548&Signature=IuVIJmXHm0hE.
- OFORI-BOATENG, C.; LEE, K. T.; MENSAH, M. The prospects of electricity generation from municipal solid waste (MSW) in Ghana: A better waste management option. **Fuel Processing Technology**, v. 110, p. 94–102, 2013. DOI 10.1016/j.fuproc.2012.11.008. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.11.008>.

- OGUNJUYIGBE, A. S. O.; AYODELE, T. R.; ALAO, M. A. Electricity generation from municipal solid waste in some selected cities of Nigeria: An assessment of feasibility, potential and technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, n. May, p. 149–162, 2017. DOI 10.1016/j.rser.2017.05.177. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.177>.
- OUDA, O. K. M.; RAZA, S. A.; NIZAMI, A. S.; REHAN, M.; AL-WAKED, R.; KORRES, N. E. Waste to energy potential: A case study of Saudi Arabia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 328–340, 2016. DOI 10.1016/j.rser.2016.04.005. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.005>.
- PAES, M. X.; DE MEDEIROS, G. A.; MANCINI, S. D.; GASOL, C.; PONS, J. R.; DURANY, X. G. Transition towards eco-efficiency in municipal solid waste management to reduce GHG emissions: The case of Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121370, 2020. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.121370. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121370>.
- PALLOTTINO, S.; SECHI, G. M.; ZUDDAS, P. A DSS for water resources management under uncertainty by scenario analysis. **Environmental Modelling and Software**, v. 20, n. 8, p. 1031–1042, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.09.012>.
- PAN, M.; LU, F.; ZHU, Y.; LI, H.; YIN, J.; LIAO, Y.; TONG, C.; ZHANG, F. 4E analysis and multiple objective optimizations of a cascade waste heat recovery system for waste-to-energy plant. **Energy Conversion and Management**, v. 230, p. 113765, 2021. DOI 10.1016/j.enconman.2020.113765. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113765>.
- PANIGRAHI, S.; DUBEY, B. K. A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Renewable Energy**, v. 143, p. 779–797, 2019. DOI 10.1016/j.renene.2019.05.040. Available at: b.
- PIN, B. V. R.; BARROS, R. M.; SILVA LORA, E. E.; DOS SANTOS, I. F. S. Waste management studies in a Brazilian microregion: GHG emissions balance and LFG energy project economic feasibility analysis. **Energy Strategy Reviews**, v. 19, p. 31–43, 2018. DOI 10.1016/j.esr.2017.11.002. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.11.002>.
- PIROTTA, F. J. C.; FERREIRA, E. C.; BERNARDO, C. A. Energy recovery and impact on land use of Maltese municipal solid waste incineration. **Energy**, v. 49, n. 1, p. 1–11, 2013. DOI 10.1016/j.energy.2012.10.049. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.049>.
- POURREZA MOVAHED, Z.; KABIRI, M.; RANJBAR, S.; JODA, F. Multi-objective optimization of life cycle assessment of integrated waste management based on genetic algorithms: A case study of Tehran. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, p. 119153, 2020. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.119153. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119153>.
- PRATEEP NA TALANG, R.; SIRIVITHAYAPAKORN, S. Environmental and financial assessments of open burning, open dumping and integrated municipal solid waste

- disposal schemes among different income groups. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, n. May, p. 127761, 2021. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.127761. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127761>.
- PSOMOPOULOS, C. S.; BOURKA, A.; THEMELIS, N. J. Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. **Waste Management**, v. 29, n. 5, p. 1718–1724, 2009. DOI 10.1016/j.wasman.2008.11.020. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.020>.
- RAC, B. da. Planta piloto para aproveitamento energético do biogás. 2018. Available at: <https://www.racsaneamento.com.br/blog/planta-piloto-para-aproveitamento-energetico-do-biogas/>.
- RAJAEIFAR, M. A.; GHANAVATI, H.; DASHTI, B. B.; HEIJUNGS, R.; AGHBASHLO, M.; TABATABAEI, M. Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, n. May, p. 414–439, 2017. DOI 10.1016/j.rser.2017.04.109. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.109>.
- REBEHY, P. C. P. W.; ANDRADE DOS SANTOS LIMA, S.; NOVI, J. C.; SALGADO, A. P. Reverse logistics systems in Brazil: Comparative study and interest of multistakeholders. **Journal of Environmental Management**, v. 250, n. June, p. 109223, 2019. DOI 10.1016/j.jenvman.2019.06.124. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.124>.
- REBEHY, P. C. P. W.; COSTA, A. L.; CAMPELLO, C. A. G. B.; DE FREITAS ESPINOZA, D.; NETO, M. J. Innovative social business of selective waste collection in Brazil: Cleaner production and poverty reduction. **Journal of Cleaner Production**, v. 154, p. 462–473, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.173>.
- REDDY, P. J. Municipal Solid Waste Management Processing, Energy Recovery, Global Examples. , p. 449, 2011. .
- REZAEI, H.; YAZDANPANA, F.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. Pelletization properties of refuse-derived fuel - Effects of particle size and moisture content. **Fuel Processing Technology**, v. 205, n. January, p. 106437, 2020. DOI 10.1016/j.fuproc.2020.106437. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106437>.
- ROTHENBERGER, S.; ZURBRÜGG, C.; ENAYETULLAH, I.; SINHA, a H. M. M. **Decentralised Composting for Cities of Low- and Middle- Income Countries**. [S. l.: s. n.], 2006. Available at: https://www.susana.org/_resources/documents/default/3-3025-7-1520433934.pdf.
- SAM, S. A. M. Tutorial Help, National Renewable Energy Laboratory (NREL). Versão 2020.2.29. 2021. Available at: <https://sam.nrel.gov/>.
- SANTOS, R. E. dos; SANTOS, I. F. S. dos; BARROS, R. M.; BERNAL, A. P.; TIAGO FILHO, G. L.; SILVA, F. das G. B. da. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 231, n. October 2018, p. 198–206, 2019. DOI

- 10.1016/j.jenvman.2018.10.015. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.015>.
- SANTOS, M. J.; FERREIRA, P.; ARAÚJO, M.; PORTUGAL-PEREIRA, J.; LUCENA, A. F. P.; SCHAEFFER, R. Scenarios for the future Brazilian power sector based on a multi-criteria assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 938–950, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.145>.
- SCHMIDT, T. S.; DABUR, S. Explaining the diffusion of biogas in India: A new functional approach considering national borders and technology transfer. **Environmental Economics and Policy Studies**, v. 16, n. 2, p. 171–199, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10018-013-0058-6>.
- SELUR. Três anos após a regulamentação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS): Seus gargalos e superações. 2014. Available at: http://www.selur.com.br/wordpress/wp-content/uploads/2014/08/Estudo_Selur_2014-final.pdf.
- SEMA RS, S. do M. A. e I. RS aposta em biometano para ampliar oferta de gás. 2020. Available at: <https://www.sema.rs.gov.br/rs-aposta-em-biometano-para-ampliar-oferta-de-gas>.
- SHAHID, K.; HITTINGER, E. Techno-economic optimization of food waste diversion to treatment facilities to determine cost effectiveness of policy incentives. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, n. January 2016, p. 122634, 2021. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.122634. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122634>.
- SHI, H.; MAHINPEY, N.; AQSHA, A.; SILBERMANN, R. Characterization, thermochemical conversion studies, and heating value modeling of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 48, p. 34–47, 2016. DOI 10.1016/j.wasman.2015.09.036. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.036>.
- SILVA, L. J. de V. B. da; SANTOS, I. F. S. dos; MENSAH, J. H. R.; GONÇALVES, A. T. T.; BARROS, R. M. Incineration of municipal solid waste in Brazil: An analysis of the economically viable energy potential. **Renewable Energy**, v. 149, p. 1386–1394, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.134>.
- SOUZA, A. R. de; SILVA, A. T. Y. L.; TRINDADE, A. B.; FREITAS, F. F.; ANSELMO, J. A. Analysis of the potential use of landfill biogas energy and simulation of greenhouse gas emissions of different municipal solid waste management scenarios in varginha, MG, Brazil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 5, p. 887–896, 2019. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019187066>.
- SUN, Y.; XUE, L.; ZHANG, Y.; ZHAO, X.; HUANG, Y.; DU, X. High flux polyamide thin film composite forward osmosis membranes prepared from porous substrates made of polysulfone and polyethersulfone blends. **Desalination**, v. 336, n. 1, p. 72–79, 2014. DOI 10.1016/j.desal.2013.12.036. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2013.12.036>.
- SURESH, S. S.; BONDA, S.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. A review on computer waste

- with its special insight to toxic elements, segregation and recycling techniques. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 116, p. 477–493, 2018. DOI 10.1016/j.psep.2018.03.003. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.03.003>.
- SWANA. From Solid Waste Management to Resource Efficiency and Energy Recovery in The United States. 2018. 2018. .
- TAN, C.; XU, G.; LI, Y.; XU, Y.; SU, G. Boundary image reconstruction based on the nonmonotonic and self-adaptive trust region method for electrical impedance tomography. **Physiological Measurement**, v. 34, n. 8, p. 951–962, 2013. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/34/8/951>.
- TEIXEIRA, S.; MONTEIRO, E.; SILVA, V.; ROUBOA, A. Prospective application of municipal solid wastes for energy production in Portugal. **Energy Policy**, v. 71, p. 159–168, 2014. DOI 10.1016/j.enpol.2014.04.002. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.002>.
- TOZLU, A.; ÖZAHİ, E.; ABUŞOLLU, A. Waste to energy technologies for municipal solid waste management in Gaziantep. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 809–815, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.097>.
- TRINDADE, A. B.; PALACIO, J. C. E.; GONZÁLEZ, A. M.; RÚA OROZCO, D. J.; LORA, E. E. S.; RENÓ, M. L. G.; DEL OLMO, O. A. Advanced exergy analysis and environmental assesment of the steam cycle of an incineration system of municipal solid waste with energy recovery. **Energy Conversion and Management**, v. 157, n. November 2017, p. 195–214, 2018. DOI 10.1016/j.enconman.2017.11.083. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.083>.
- TROCHU, J.; CHAABANE, A.; OUHIMMOU, M. A two-stage stochastic optimization model for reverse logistics network design under dynamic suppliers' locations. **Waste Management**, v. 95, p. 569–583, 2019. DOI 10.1016/j.wasman.2019.06.012. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.012>.
- TSAI, W. T. Bioenergy from landfill gas (LFG) in Taiwan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 2, p. 331–344, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.01.001>.
- TSUNATU, D. Y.; TICKSON, T. S.; SAM, K. D.; NAMO, J. M. Municipal Solid Waste as Alternative Source of Energy Generation: A Case Study of Jalingo Metropolis–Taraba State. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 5, n. 3, p. 185–193, 2015. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Tsunatu_Danlami_Yavini/publication/284133769_Municipal_Solid_Waste_as_Alternative_Source_of_Energy_Generation_A_Case_Study_of_Jalingo_Metropolis_-_Taraba_State_Tsunatu_DY_Tickson_TS_Sam_KD_and_NamoJM/links/564c383b08ae.
- UNNIKRISHNAN, S.; SINGH, A. Energy recovery in solid waste management through CDM in India and other countries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 10, p. 630–640, 2010. DOI 10.1016/j.resconrec.2009.11.003. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.11.003>.

- USEPA, U. S. E. P. A. Landfill gas emissions model. United States Environmental Protection Agency, Version 3.02 user's guide. n. May, p. 48, 2005. Available at: <http://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>.
- VAN CANEGHEM, J.; BREMS, A.; LIEVENS, P.; BLOCK, C.; BILLEN, P.; VERMEULEN, I.; DEWIL, R.; BAEYENS, J.; VANDECASTEELE, C. Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental issues. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 38, n. 4, p. 551–582, 2012. DOI 10.1016/j.pecs.2012.03.001. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2012.03.001>.
- WALTZ, R. A.; MORALES, J. L.; NOCEDAL, J.; ORBAN, D. An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps. **Mathematical Programming**, v. 107, n. 3, p. 391–408, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10107-004-0560-5>.
- WANG, S.; WEN, Y.; SHI, Z.; NURAN ZAINI, I.; GÖRAN JÖNSSON, P.; YANG, W. Novel carbon-negative methane production via integrating anaerobic digestion and pyrolysis of organic fraction of municipal solid waste. **Energy Conversion and Management**, v. 252, n. August 2021, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115042>.
- WANG, Z.; GENG, L. Carbon emissions calculation from municipal solid waste and the influencing factors analysis in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 104, p. 177–184, 2015. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.05.062. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.062>.
- WWF-BRASIL. **Guia de Compostagem**. [S. l.: s. n.], 2015. Available at: <https://www.wwf.org.br/?56608/guia-para-compostagem>.
- YAP, H. Y.; NIXON, J. D. A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK. **Waste Management**, v. 46, p. 265–277, 2015. DOI 10.1016/j.wasman.2015.08.002. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.002>.
- YOSHIO, N.; BIEGLER, L. T. Demand-based optimization of a chlorobenzene process with high-fidelity and surrogate reactor models under trust region strategies. **AIChE Journal**, v. 67, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.1002/aic.17054>.
- ZAMRI, M. F. M. A.; HASMADY, S.; AKHIAR, A.; IDERIS, F.; SHAMSUDDIN, A. H.; MOFIJUR, M.; FATTAH, I. M. R.; MAHLIA, T. M. I. A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, n. November 2020, p. 110637, 2021. DOI 10.1016/j.rser.2020.110637. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110637>.
- ZHANG, C.; SU, H.; BAEYENS, J.; TAN, T. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 383–392, 2014. DOI 10.1016/j.rser.2014.05.038. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>.
- ZHAO, X. gang; JIANG, G. wu; LI, A.; WANG, L. Economic analysis of waste-to-energy industry in China. **Waste Management**, v. 48, p. 604–618, 2016. DOI

10.1016/j.wasman.2015.10.014. Available at:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.014>.

ZHENG, L.; SONG, J.; LI, C.; GAO, Y.; GENG, P.; QU, B.; LIN, L. Preferential policies promote municipal solid waste (MSW) to energy in China: Current status and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 135–148, 2014. DOI 10.1016/j.rser.2014.04.049. Available at:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.049>.

ZIA, U. U. R.; RASHID, T. ur; ALI, M.; AWAN, W. N. Techno-economic assessment of energy generation through municipal solid waste: a case study for small/medium size districts in Pakistan. **Waste Disposal & Sustainable Energy**, v. 2, n. 4, p. 337–350, 2020. DOI 10.1007/s42768-020-00056-7. Available at:
<https://doi.org/10.1007/s42768-020-00056-7>.

ZIRKLER, D.; PETERS, A.; KAUPENJOHANN, M. Elemental composition of biogas residues: Variability and alteration during anaerobic digestion. **Biomass and Bioenergy**, v. 67, p. 89–98, 2014. DOI 10.1016/j.biombioe.2014.04.021. Available at:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.04.021>.

APÊNDICE I

← → ↻ scienceirect.com/science/article/abs/pii/S0196890422005398

ScienceDirect Journals & Books Register Sign in

View PDF Access through your institution Purchase PDF Search ScienceDirect

Outline

- Highlights
- Abstract
- Keywords
- 1. Introduction
- 2. The municipal solid waste management and waste ...
- 3. Methodology
- 4. Technological routes
- 5. Results and discussion
- 6. Conclusions
- Declaration of Competing Interest
- Acknowledgements
- References
- Show full outline

Energy Conversion and Management
Volume 265, 1 August 2022, 115743

ELSEVIER

Waste-to-energy effect in municipal solid waste treatment for small cities in Brazil

Jessé Luís Padilha, André Luiz Amarante Mesquita

Show more

+ Add to Mendeley Share Cite

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115743> Get rights and content

Recommended articles

- Performance improvement of a naturally ve...
Journal of Building Engineering, Volume 53, 2022, ...
Purchase PDF View details
- An integrated framework based on deep lear...
Energy, Volume 253, 2022, Article 124140
Purchase PDF View details
- Exergy and thermoeconomic analyses of ser...
Case Studies in Thermal Engineering, Volume 35, ...
Download PDF View details

1 2 Next

FEEDBACK

Padrão projeto - O...pdf Exibir todos

APÊNDICE II

```
!pip install git+https://github.com/numpy/numpy-financial

import numpy as np
from numpy import exp, sum, cumsum, zeros, concatenate
from numpy_financial import irr
from dataclasses import dataclass

#Argumentos da Função
def Cenario(
#Dados de entrada
    POP = 30e3,
    TCP = 0,
    ML = 0.97,
    PPlast = 13.5,
    PVidro = 2.4,
    PMetal = 2.9,
    PPapel = 13.1,
    POrg = 51.4,
    POut = 16.7,
    PRec = 31.9,
    PInc = 71.2,
    PAterro = 100,

#Incineração
    PCIInc = 8368.00,
    HAF = 8000,
    ECic = 15.00,
    ECald = 70.00,
    PCParas = 10,
#DegradacaoCombustivel (LFG)
    FCIM = 0.90,
    FMCQ = 0.00,
    PAGM = 21.00,
    OX = 0.00,
    FCH4 = 0.50,
    DOCf = 0.50,
    FCM = 0.71,
    DOCj = 0.12,
    TDRO = 0.40,
    DM = 0.0007168,
#Conversao do Combustível (DA)
    ECG = 35.00,
    PCIMet = 35530000,
    AOC = 0,
```

```

AEM = 5,
Emot = 0.33,
PGas = 170.00,
#Variáveis de viabilidade
TDCusto = 0.1161,
TDReceita = 0.1161,
#Outras constantes
PeriodoDefault = 20,
Ano = np.linspace(1,20,num=20),

#Custos instalação
#CIREC = 8.33,
COord = 137.73,
COREC = 130,
#Valores Cobrados
CD = 5.5,
VRPlastico = 1168.00,
VRVidro = 85.00,
VRMetais = 2348.00,
VRPapel = 568.00,
VRComposto = 100.00,
GE = 0.76597 #0.76597,
):

#Conversões e Equações
mbTonDia = ML*POP/1000
mbTonHora = mbTonDia/24
mbTonAno = mbTonDia*364.25
mbPlasticoTonAno = mbTonAno*PPlast/100
mbVidroTonAno = mbTonAno*PVidro/100
mbMetalTonAno = mbTonAno*PMetal/100
mbPapelTonAno = mbTonAno*PPapel/100
mbReciclavavelTonAno = mbTonAno*PRec/100
mbOrganico = mbTonAno*POrg/100
mbDAHora = mbTonHora*POrg/100
mbIncHora = mbTonHora*PInc/100
mbAterro = mbTonAno*PAterro/100

# Geração de Energia
PotDispInc=(mbIncHora*PCIInc*ECald/100*ECic/100)*(1-(PCParas/100))
PotDispDA=0.28*mbDAHora*PGas*Emot*((PCIMet/1e6))*(1-(PCParas/100))

#Geração de Energia LOCE
POTANOINC = (PotDispInc)*HAF
POTANODA = PotDispDA*HAF
POTANOLFG = Emot*(((FCIM * ( 1 - FMCQ ) *
                PAGM * ( 1 - OX ) * 16 / 12 * FCH4 *
                DOCf * FCM * (mbOrganico) *
                DOCj *

```

```

exp( -TDRO*( AOC - AEM ) ) *
( 1 - exp(-TDRO) ) / DM ) *
PCIMet/31536000000 ) *( ECG/100 ) *
( ( 100 - PCParas )/100 ) )
) * HAF      #[kWe/ano]

```

```
#Custos instalaçãox
```

```

CIAS = 8.0765*mbAterro + 628179
CIBA = 9824*(mbTonDia*170)**-0.473
CIREC = 11.593*mbReciclavelTonAno**-0.196
CIDA = (2.125*(mbDAHora*HAF)**1.1781)
CIINC = (273.67*(mbIncHora*HAF) + 50000000)

```

```
#Custos Operação
```

```

COAS = 9.5504*mbAterro+484804
COBA = (CIBA*0.17)
COREC = 130*CD
CODA = ((30.849*(mbDAHora*HAF) + 1000000)/
(mbDAHora*HAF))/CD)*1.4255
COINC = (-2E-05*(mbIncHora*HAF)+31.656)

```

```
## Fluxo de caixa
```

```
# CAPEX
```

```

CustosInvestimento = zeros((11,20))
CustosInvestimento[0,0] = 0
CustosInvestimento[1,0] = CIAS
CustosInvestimento[2,0] = CIBA*mbTonDia*107.1
CustosInvestimento[3,0] = (mbReciclavelTonAno*CIREC)
CustosInvestimento[4,0] = CIDA
CustosInvestimento[5,0] = CIINC
CustosInvestimento[6,0] = 0

```

```
# OPEX
```

```

CustosOperacionais = zeros((11,20))
CustosOperacionais[0,1:] = COord/CD)*POP
CustosOperacionais[1,1:] = OPEXtransp
CustosOperacionais[2,1:] = COAS
CustosOperacionais[3,1:] = CIBA*mbTonDia*107.1)*0.17
CustosOperacionais[4,1:] = mbReciclavelTonAno*COREC
CustosOperacionais[5,1:] = mbDAHora*HAF)*CODA
CustosOperacionais[6,1:] = mbIncHora*HAF)*COINC
CustosOperacionais[7,1:] = 0

```

```

Custos = np.concatenate((CustosInvestimento, CustosOperacionais), axis
=0)

```

```

TotalCustosI = sum(CustosInvestimento)
TotalCustosO = sum(CustosOperacionais)

```

```

TotalCustos = sum(Custos,axis=0)
VPLCustos = np.divide(TotalCustos,(1+TDCusto)**Ano)

#Receitas
Receitas = zeros((10,20))
Receitas[0,1:] = TCP*mbTonAno
Receitas[1,1:] = (VRPlastico/CD)*mbPlasticoTonAno
Receitas[2,1:] = (VRVidro/CD)*mbVidroTonAno
Receitas[3,1:] = (VRMetais/CD)*mbMetalTonAno
Receitas[4,1:] = (VRPapel/CD)*mbPapelTonAno
Receitas[5,1:] = (VRComposto/CD)*(mbOrganico*0.3)
Receitas[6,1:] = (PotDispDA*HAF)*(GE/CD)
Receitas[7,1:] = (GE/CD)*(HAF*PotDispInc)
Receitas[8,1:] = 0
Receitas[9,1:] = ((Emot*(((FCIM*(1-FMCQ))*
                        PAGM*(1-OX)*16/12*FCH4*
                        DOCf*FCM*(mbOrganico)*
                        DOCj*
                        exp(-TDRO*(AOC-AEM))*
                        (1-exp(-TDRO))/DM))*
                    PCIMet/31536000000)*(ECG/100)*
                    ((100-PCParas)/100))
                    *(GE/CD)*HAF)

TotalReceitas = sum(Receitas,axis=0)
VPLReceitas = np.divide(TotalReceitas,(1+TDReceita)**Ano)

FluxoDeCaixa = TotalReceitas-TotalCustos
VPLFluxoDeCaixa = VPLReceitas-VPLCustos
FluxoDeCaixaDescontado = cumsum(FluxoDeCaixa)
VPLFluxoDeCaixaDescontado = cumsum(VPLFluxoDeCaixa)

##VPL e TIR
VPL = sum(FluxoDeCaixa)
TIR = irr(FluxoDeCaixa)

#Fluxo de caixa descontado
Periodo = PeriodoDefault
USNegativo = max(FluxoDeCaixaDescontado)
PSPositivo = 1e-6
if any(VPLFluxoDeCaixaDescontado>0):
    i = np.nonzero(FluxoDeCaixaDescontado>0)[0][0]
    Periodo = Ano[i-1]-1
    USNegativo = FluxoDeCaixaDescontado[i-2]

```



```

    PSPositivo = FluxoDeCaixaDescontado[i-1]

PeriodoVPL = PeríodoDefault
USNegativoVPL = max(VPLFluxoDeCaixaDescontado)
PSPositivoVPL = 1e-6

if any(VPLFluxoDeCaixaDescontado>0):
    i = np.nonzero(VPLFluxoDeCaixaDescontado>0)[0][0]
    PeríodoVPL = Ano[i-1]-1
    USNegativoVPL = VPLFluxoDeCaixaDescontado[i-2]
    PSPositivoVPL = VPLFluxoDeCaixaDescontado[i-1]

PaybackBruto = Período + abs(USNegativo)/(-USNegativo+PSPositivo)
PaybackDescontado=PeríodoVPL+abs(USNegativoVPL)/(-
USNegativoVPL+PSPositivoVPL)

CRF = TDCusto*(1+TDCusto)**(20)/((1+TDCusto)**(20)-1)

LCOE = (TotalCustosI*CRF+TotalCustosO)/(POTANOINC+POTANOLFG+POTANODA)

return LCOE, PaybackDescontado, PaybackBruto, VPL, TIR

###Script Otimização

from scipy.optimize import minimize, BFGS, SR1
from scipy.optimize import Bounds, NonlinearConstraint
import numpy as np

def CenarioRestrito(x):

    LCOE, PaybackDescontado, PaybackBruto, VPL, TIR = Cenario(TCP=x)

return TIR
#return PaybackDescontado

def custo(x):
    return x[0]**2

metodo = 'trust-constr'
g = NonlinearConstraint(CenarioRestrito, 0.1345, 0.1345) # a<= g(
x) <=b 0.1347

```

```
#g = NonlinearConstraint(CenarioRestrito, 19.9, 19.9)      # a<= g(x)
<=b
b = Bounds(-1500000,1500000)

opt = {'maxiter':100000000}

sol = minimize(custo, (6600.), method=metodo, bounds=b, constraints=g, op
tions=opt)

print(sol)
print(CenarioRestrito(sol.x))
```