

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Reobe Ozéias Machado

**AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DOS GASES DO EFEITO ESTUFA NA GESTÃO DOS
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE FLORIANÓPOLIS, SANTA
CATARINA.**

Florianópolis, Santa Catarina.

2022

Reobe Ozéias Machado

**Avaliação da Emissão dos Gases do Efeito Estufa na Gestão dos Resíduos Sólidos
Urbanos do Município de Florianópolis, Santa Catarina.**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental

Orientador: Prof. Marcelo Seleme Matias, Dr.
Coorientadora: Eduarda Piaia, Msc.

Florianópolis, Santa Catarina

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Machado, Reobe Ozéias

Avaliação da Emissão dos Gases do Efeito Estufa na
Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município de
Florianoópolis, Santa Catarina / Reobe Ozéias Machado ;
orientador, Marcelo Seleme Matias, coorientadora, Eduarda
Piaia, .

81 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,
Florianoópolis, .

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Resíduos Sólidos
Urbanos. 3. Gestão de resíduos. 4. Recuperação energética.
5. GEE. I. Seleme Matias, Marcelo . II. Piaia, Eduarda.
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Reobe Ozéias Machado

**Avaliação da Emissão dos Gases do Efeito Estufa na Gestão dos Resíduos Sólidos
Urbanos do Município de Florianópolis, Santa Catarina**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 15 de dezembro de 2022.

Prof. Dr. Maria Elisa Magri
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Marcelo Seleme Matias
Universidade Federal de Santa Catarina

Eduarda Piaia
Universidade Federal de Santa Catarina

Vanice Helen Nakano,
Instituto 17

Armando Borges de Castilhos Junior
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao meu filho Martin, por ser minha grande inspiração em tornar esse mundo melhor e materializar o amor que nunca serei capaz de expressar. À minha esposa Patricia, que além de ser o amor da minha vida é meu maior exemplo de dedicação em tudo que faz, sem ela não seria possível.

Aos meus pais por me darem o privilégio de priorizar os estudos em todas as fases da vida, em especial à minha mãe que esteve sempre comigo em todas as etapas até aqui. Aos meus irmãos por dividirem comigo esse privilégio.

À minha coorientadora Eduarda pelo fervor que dedica a esse tema tão importante e necessário que é a gestão dos resíduos e também à vida acadêmica e profissional, além de ser uma pessoa excepcional.

Ao meu orientador Marcelo, que tive o grande prazer de ser aluno e sempre o admirei pela vontade e preocupação de compartilhar seu conhecimento, que pude adquirir novamente em sua orientação.

Aos meus colegas de faculdade, que foram muitos ao longo desses anos, que dividiram as frustrações da vida acadêmica e sempre formaram um laço de mutualidade não só para vencer os desafios da graduação, mas também na busca do conhecimento e preocupação com o meio ambiente.

À UFSC, por ser minha casa durante duas graduações e pela qual me orgulho imensamente em receber a formação de excelência que as universidades públicas oferecem no nosso país.

*“Falta de verde vai fazer chover pra cima
Nuvens de aço soltam pingos de metal
No amor de um operário esquecido
Sob as bases de um parque industrial.*

*Lá na cidade já tem rio pedindo água
Pulando cedo do seu leito pra fugir
Na esperança de não entrar pelo cano
Chegar ao mar antes de se poluir.”*

(Lucena/Velho, 1983)

RESUMO

Entre 2010 e 2019, o incremento na geração de Resíduos Sólidos Urbanos – RSU, foi de 19% no Brasil e a destinação ambientalmente adequada é pouco variada, concentrando-se na disposição em aterros sanitários. O desafio na gestão dos RSU é encontrar meios ambientalmente adequados que mitiguem esse impacto gerado pelo consumo exagerado e inércia administrativa. O objetivo desse trabalho é mostrar que o destino ambientalmente adequado mais utilizado no Brasil atualmente (aterros sanitários), dentre vários impactos ambientais, emite uma quantidade de Gases de Efeito Estufa (GEE) maior que outros tipos de tratamento, como por exemplo a geração de energia através do Combustível Derivado de Resíduo (CDR), a produção de biometano e a Reciclagem. Foram realizadas duas análises, ambas com 4 cenários, avaliando o desempenho de diferentes tipos de tratamento de RSU. A primeira análise simula as emissões na gestão atual do município de Florianópolis e um horizonte próximo na implementação do Programa Lixo Zero 2030. A segunda análise vislumbra uma situação mais otimista com altas taxas de reciclagem e uma gestão que implemente o aproveitamento energético e diferentes tipos de tratamento. Um cenário-base foi elaborado com todo o material destinado apenas ao aterro sanitário sem nenhum tipo de tratamento. O cenário-base é utilizado para medir o potencial de redução de emissão dos cenários. O cálculo das emissões foi feito através da Calculadora de Emissões de GEE para Resíduos, projeto ProteGEEr, coordenado pela Secretaria Nacional de Saneamento em parceria com a Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, utilizando a Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Os resultados encontrados demonstram que o tratamento biológico para a produção de biometano e a produção do CDR para o coprocessamento em cimenteiras tem grande potencial de redução nas emissões dos gases do efeito estufa. A emissão total para a massa de resíduos no cenário-base foi de 370.825 toneladas de CO₂ equivalente/ano. O cenário com produção do biometano, e aumento nas taxas de reciclagem para 50% resultou em uma emissão líquida de 38.063 toneladas de CO₂ equivalente/ano, uma redução de 89,7% em relação à emissão de toda a massa disposta no aterro sanitário.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Gestão de resíduos. Reciclagem. Recuperação energética. GEE.

ABSTRACT

Between 2010 and 2019, the increase in the generation of Urban Solid Waste - RSU, was 19% in Brazil and the environmentally appropriate destination is little variable, focusing on disposal in landfills. The challenge in MSW management is to find environmentally appropriate means to mitigate this impact generated by excessive consumption and administrative inertia. The objective of this work is to show that the environmentally appropriate destination most used in Brazil today (landfill disposal), among several environmental impacts, emits a greater amount of Greenhouse Gases (GHG) - than other treatments, such as the generation of energy through Defuse Derived Fuel (RDF), biomethane production and recycling. Two analyzes were carried out, both with 4 scenarios, evaluating the performance of different types of MSW treatment. The first analysis simulates emissions in the current management of the municipality of Florianópolis and a close horizon in the implementation of the Floripa Lixo Zero 2030 Program. The second analysis assumes a more optimistic situation with high recycling rates and a management that implements energy utilization and different types of treatment. A baseline scenario was created with all the material destined only for the landfill without any type of treatment. The baseline scenario is used to measure the emission reduction potential of the scenarios. Emissions were calculated using the Calculadora de Emissões de GEE para Resíduos, a ProteGEEr project, coordinated by the Secretaria Nacional de Saneamento in partnership with the German Cooperation for Sustainable Development, using the Life Cycle Assessment Methodology (LCA). The results found demonstrate that the biological treatment for the production of biomethane and the production of RDF for co-processing in cement plants has great potential for reducing greenhouse gas emissions. The total emission for the mass of waste in the base scenario was 370,825 tons of CO₂ equivalent/year. The scenario with biomethane production and an increase in recycling rates to 50% resulted in a net emission of 38,063 tons of CO₂ equivalent/year, a reduction of 89.7% in relation to the emission of the entire mass disposed of in the landfill.

Keywords: Municipal Solid Waste. Waste Management. Recycling. Energy Recovery. GHG.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Municípios com iniciativas de Coleta Seletiva (%) Fonte: ABRELPE, 2020.	20
Figura 2 – Fluxograma geral do modelo de coleta seletiva no município de Florianópolis/SC.....	24
Figura 3 – Aproveitamento energético de resíduos na ordem prioritária da PNRS... ..	26
Figura 4 – Possibilidades de Aproveitamento através da biodigestão anaeróbia dos RSU.	29
Figura 5 – Esquema do incinerador <i>mass burn</i>	31
Figura 6 – Distribuição das publicações relacionadas ao setor de gestão de resíduos utilizando a ACV, classificada por Revistas.	37
Figura 7 – Etapas da elaboração do trabalho.....	39
Figura 8 – Fluxograma dos cenários.	40
Figura 9 – Visão geral da calculadora.	45
Figura 10 – Instruções de uso no Manual da Calculadora.	46
Figura 11 – Resumo da Análise 1	47
Figura 12 – Resumo da Análise 2	47
Figura 13 – Fluxograma da Análise 1	48
Figura 14 – Fluxograma da Análise 2.	50
Figura 15 – Fluxo dos cenários na Análise 1	52
Figura 16 – Fluxo dos cenários na Análise 2	53
Figura 17 – Dados inseridos na aba Início.	54
Figura 18 – Dados inseridos na aba Reciclagem para a Análise 1.....	56
Figura 19 – Dados inseridos na aba Destinação para a Análise 1.....	56
Figura 20 - Dados inseridos na aba Destinação para a Análise 1.....	57
Figura 21 - Dados inseridos na aba Destinação para a Análise 1.....	57
Figura 22 – Resumo das emissões de GEE na Análise 1.	58
Figura 23 – Emissões emitidas e evitadas por etapa da Análise 1	59
Figura 24 - Emissões do cenário 1.1 quanto à destinação de resíduos.....	60
Figura 25 - Emissões do cenário 1.2 quanto à reciclagem	61
Figura 26 – Emissões do cenário 1.2 quanto à destinação.	62
Figura 27 - Emissões do cenário 1.3 quanto à reciclagem.	63
Figura 28 - Emissões do Cenário 1.3 quanto à destinação.	64

Figura 29 - Dados inseridos na aba Reciclagem para a Análise 2	66
Figura 30 - Dados inseridos na aba Destinação para a Análise 2.....	66
Figura 31 - Dados inseridos na aba Destinação para a Análise 2.....	67
Figura 32 - Resumo das emissões de GEE na Análise 2.....	68
Figura 33 – Resumo das emissões no cenário-base 2	69
Figura 34 - Resumo das emissões no cenário 2.1.....	69
Figura 35 - Resumo das emissões no cenário 2.2.....	71
Figura 36 - Resumo das emissões no cenário 2.3.....	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Sistematização do Programa de Coleta Seletiva dos Resíduos Secos.22

Quadro 2 - Sistematização do Programa de Coleta Seletiva dos Resíduos Orgânicos.

.....23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites para classificação dos RSU	33
Tabela 2 – Fatores de Multiplicação para o Potencial de Aquecimento Global Fonte: (Brasil, 2021).	33
Tabela 3 – Fatores de emissão de matérias recicláveis	34
Tabela 4 – Dados no tratamento de resíduos orgânicos	35
Tabela 5 – Peso por Material da Coleta Seletiva de Florianópolis (ano base 2014)..	41
Tabela 6 - Peso Total por Material de Florianópolis (kg.ano ⁻¹ : Ano base: 2014)	42
Tabela 7 - Gravimetria dos resíduos totais adaptada para a entrada de dados na calculadora.....	43
Tabela 8– Gravimetria dos recicláveis adaptada para a entrada de dados na calculadora	43
Tabela 9 – Resumo da Análise 1	55
Tabela 10 – Emissões do Cenário 1.1 quanto à destinação de resíduos (toneladas de CO ₂ -eq/ano).....	60
Tabela 11 - Emissões do Cenário 1.2 quanto à reciclagem dos resíduos	61
Tabela 12 - Emissões do Cenário 1.3 quanto à reciclagem dos resíduos.....	62
Tabela 13 – Resumo da Análise 2	65
Tabela 14 - Emissões quanto à reciclagem e descarte de resíduos no cenário-base. .	68
Tabela 15 - Emissões quanto à reciclagem e descarte de resíduos no Cenário 1.....	70
Tabela 16 - Emissões quanto à reciclagem e descarte de resíduos no Cenário 2.....	70
Tabela 17 - Emissões quanto à reciclagem e descarte de resíduos no Cenário 3.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

CDR Combustível Derivado de Resíduo

GEE Gases do Efeito Estufa

PNRS Política Nacional de Resíduos Sólidos

NBR Norma Brasileira

ACV Avaliação do Ciclo de Vida

PMCS Plano Municipal de Coleta Seletiva

SINIR Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos

SNIS Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SMHSA Secretaria Municipal de Habitação e Saneamento

RSU Resíduos Sólidos Urbanos

CO₂ eq Dióxido de Carbono equivalente

AER Aproveitamento Energético de Resíduos

PLANARES Plano Nacional de Resíduos Sólidos

PCI Poder Calorífico Inferior

GWP Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.2	Objetivos Específicos	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	18
3.2	COLETA SELETIVA NO BRASIL	20
3.2.1	Coleta Seletiva em Florianópolis.....	21
3.3	TIPOS DE TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	25
3.3.1	Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	25
3.3.2	Tratamento Biológico.....	27
3.3.3	Produção de Biogás por meio da biodigestão anaeróbia.....	28
3.3.4	Produção de Biogás em Aterros Sanitários.....	29
3.3.5	Tratamento Térmico	30
3.3.6	Combustível Derivado de Resíduos - CDR.....	31
3.4	EMISSÕES DE GEE NO MANEJO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS....	33
3.5	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV – NO MANEJO DE RSU NO BRASIL	35
3.5.1	Histórico.....	36
3.5.2	Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).....	37
4	METODOLOGIA.....	39
4.1	CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	40
4.2	LEVANTAMENTO DOS DADOS	41
4.3	ESTIMATIVA DE EMISSÕES: FERRAMENTA DE CÁLCULO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) NO MANEJO DE RSU PARA O BRASIL.....	44

4.4	ANÁLISES REALIZADAS	46
4.5	DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS.....	47
4.5.1	Análise 1: Cenário-base 1.....	48
4.5.2	Análise 1: Cenário 1.1.....	49
4.5.3	Análise 1: Cenário 1.2.....	49
4.5.4	Análise 1: Cenário 1.3.....	49
4.5.5	Fluxograma da Análise 2	50
4.5.6	Análise 2: Cenário-base 2.....	51
4.5.7	Análise 2: Cenário 2.1.....	51
4.5.8	Análise 2: Cenário 2.2.....	51
4.5.9	Análise 2: Cenário 2.3.....	51
4.6	FLUXO DOS CENÁRIOS	52
5	RESULTADOS	53
5.1	DADOS INSERIDOS NA FERRAMENTA.....	54
5.2	RESULTADOS DAS ANÁLISES	54
5.2.1	Análise 1.....	54
<i>5.2.1.1</i>	<i>Resultados Análise 1.....</i>	<i>57</i>
5.2.1.1.1	Detalhamento do Cenário-base 1	59
5.2.1.1.2	Detalhamento do Cenário 1.1	59
5.2.1.1.3	Detalhamento do Cenário 1.2	60
5.2.1.1.4	Detalhamento do cenário 1.3	62
5.2.2	Análise 2.....	64
<i>5.2.2.1</i>	<i>Resultados Análise 2.....</i>	<i>67</i>
5.2.2.1.1	Detalhamento do cenário-base 2.....	68
5.2.2.1.2	Detalhamento do cenário 2.1	69
5.2.2.1.3	Detalhamento do cenário 2.2	70
5.2.2.1.4	Detalhamento do cenário 2.3	71

6	CONCLUSÃO.....	73
	REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

A geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil sofreu substancial incremento entre 2010 e 2019. Segundo o *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*, a produção passou de 67 para 79 milhões de toneladas por ano, o que representa um aumento de 19%. Dentre as justificativas para tal incremento está a renda das famílias brasileiras, já que a renda alta é um indicador que eleva a taxa de geração de RSU e segundo o Banco Mundial (2012) a taxa de geração é influenciada pelo desenvolvimento econômico, grau de industrialização, taxa de urbanização e o clima local (ABRELPE, 2020).

Com a crescente demanda, a coleta e a disposição final dos RSU estão entre os grandes desafios na gestão pelas esferas municipal e regional. Como solução para esse desafio, o resultado deve ser tecnicamente viável, sustentável econômica e socialmente, ter respaldo legal e garantir o menor impacto ambiental (ABDEL-SHAFY; MANSOUR, 2018). No caminho inverso da escalada de geração está o investimento no setor, que não acompanhou a inflação. Para efeito de comparação, em uma década (2010 a 2019), o acréscimo dos recursos aplicados na coleta e demais serviços foi de R\$7,68 para R\$10,15 por habitante por mês, ou seja, aumento de 32%, enquanto a inflação no mesmo período foi de 76% (ABRELPE, 2020).

Segundo a ABRELPE (2020), a cobertura de coleta em todas as regiões do Brasil foi de 88% em 2010 para 92% em 2019. A coleta de RSU no Brasil está dividida em indiferenciada, quando não há segregação prévia e coleta seletiva quando há separação na fonte geradora. A coleta seletiva é o modelo ideal, porém longe de se tornar realidade no país. (PLANARES, 2022). No que tange a disposição final dos RSU, em 2019 a taxa de destinação adequada (em aterros sanitários, segundo a Abrelpe) foi de 59,9%, já 40,5% foi destinado de maneira inadequada (aterros controlados e lixões) (ABRELPE, 2020).

Em seu art. 3º, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) define que destinação ambientalmente adequada também engloba a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético ou outras destinações que sejam aprovadas por órgãos competentes. A disposição em aterros sanitários, considerada ambientalmente adequada, segundo a lei, deveria se enquadrar apenas aos resíduos que já foram esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação e não apresentam outra alternativa além do envio ao aterro sanitário (PLANARES, 2022). Cabe ressaltar ainda que estudos técnicos e científicos demonstraram que a gestão tradicional baseada no aterro sanitário contribui para o incremento

das emissões dos gases de efeito estufa (GEE), potencial de contaminação a médio e longo prazo e manutenção onerosa após o encerramento da operação. (PLANSAB, 2019).

A reciclagem dos resíduos secos enfrenta um conjunto de fatores que influenciam sua viabilidade econômica e afetam os índices de aproveitamento de alguns materiais específicos (PLANARES, 2022). Quanto às ações de coleta seletiva, são registradas em 73% dos municípios brasileiros, porém a falta de separação adequada sobrecarrega a destinação final, que se aproxima do esgotamento. Os índices de reciclagem dos resíduos secos a nível nacional são menores que 4%. A reciclagem dos resíduos orgânicos é ainda mais preocupante, a matéria orgânica representa 45,3% de toda a geração de RSU no Brasil e apenas 0,3% foram valorizadas em unidades de compostagem em 2018 (ABRELPE, 2020).

O aproveitamento energético pode ser aplicado como recurso na solução dos desafios do aumento da taxa de geração de RSU e na resolução dos problemas de infraestrutura e no aumento de produtividade. A produção de conhecimentos tecnológicos e científicos é uma forma de avaliar as diferentes tecnologias no âmbito social, econômico e ambiental, atendendo a demanda de alternativas necessárias ao modelo de gestão atual (PLANSAB, 2019). O aproveitamento energético foi incluído como uma das possibilidades para a destinação final ambientalmente adequada no art. 9º da PNRS, sendo um caminho alternativo para melhor aproveitamento dos materiais considerados rejeitos (BRASIL, 2019).

Considerando todas essas questões na problemática da gestão dos RSU, o objetivo deste trabalho é estimar a emissão dos gases de efeito estufa utilizando a Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no manejo de RSU para o Brasil, que se baseia em premissas da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), método muito utilizado desde a década de 90 na gestão dos resíduos para avaliar diferentes cenários. A ferramenta é disponibilizada pelo Governo Federal, no âmbito do projeto de cooperação ProteGEEr. A calculadora foi utilizada para comparar a potencial redução de emissão entre cenários sem reciclagem e também pelos cenários da reciclagem no município de Florianópolis. A comparação também se dá com cenários distintos onde diferentes porções são enviadas ao aterro sanitário, reciclagem e aproveitamento energético, simulando a eficiência dos tipos de tratamento disponíveis no quesito emissão de GEE.

Diferentes simulações foram realizadas na ferramenta a fim de confirmar as informações obtidas através da bibliografia especializada. O Plano Municipal da Coleta Seletiva (PMCS) foi utilizado para a obtenção da gravimetria e também serviu como base para a elaboração dos cenários, assim como os planos nacionais e diagnósticos na gestão dos RSU.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Quantificar as emissões de CO₂ equivalente em diferentes cenários aplicáveis ao município de Florianópolis/SC, construídos com base na bibliografia e em planos de gestão de resíduos sólidos urbanos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Construir diferentes cenários a serem analisados por meio da Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil;
2. Identificar as emissões de CO₂ equivalente para cada cenário analisado calculado pela Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A primeira definição dada para resíduos sólidos pela Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, em seu Artigo 3º é a seguinte:

XVI - resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível; (BRASIL, 2010)

A partir dessa definição, mais adiante, especificamente no Artigo 13, os resíduos sólidos são classificados de acordo com sua origem:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios (BRASIL, 2010).

A norma NBR 10004 (ABNT, 2004) atualiza e aperfeiçoa a NBR 10004 (ABNT, 1987) quanto à classificação dos resíduos sólidos, identificando os processos ou atividades em sua origem e também quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, dando base para a gestão adequada.

As classes criadas pela NBR 10004 (ABNT, 2004) levam em conta os riscos potenciais à saúde pública e ao meio ambiente. As duas classes estabelecidas são:

- a) resíduos classe I – Perigosos;
- b) resíduos classe II – Não perigosos;

- resíduos classe II A – Não inertes.

- resíduos classe II B - Inertes

Os resíduos Perigosos (classe I) são aqueles resíduos que, por suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, apresentam risco à saúde pública e riscos ao meio ambiente. Os resíduos não perigosos (classe II) podem ser restos de alimentos, sucata, papel e papelão etc e são divididos ainda em classe II A e B. Os resíduos não inertes (Classe II A) são os que não se enquadram como perigosos e tampouco inertes, pois possuem ainda certas propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Por último, os resíduos inertes da classe II B são os resíduos que quando submetidos a um contato estático ou dinâmico com água, não tenham nenhum de seus componentes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água. Para a gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos – RSU no Brasil, um importante instrumento da PNRS, definido pelo inciso XI, Artigo 8º é o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos – Sinir (BRASIL, 2010). O Sinir é coordenado e articulado pelo Ministério do Meio Ambiente – MMA, porém a organização e manutenção são de responsabilidade compartilhada entre as esferas municipais, estaduais e Distrito Federal. Os dados devem ser fornecidos anualmente pelo ente responsável nos canais e formatos criados para esse fim (SINIR, 2022).

A partir de 2019, o SINIR iniciou a coleta de dados a partir de três módulos: Estados e municípios, coletando informações sobre a gestão dos entes federativos; Manifesto de Transporte de Resíduos - MTR, que rastreia e controla a geração, transporte e a destinação final dos resíduos sólidos no Brasil; Inventário Nacional de Resíduos Sólidos, preenchido anualmente contendo os dados sobre geração, tipologia, armazenamento, transporte e destinação final dos resíduos gerados pelas indústrias brasileiras. (SINIR, 2022).

Outra ferramenta importante na gestão dos RSU é o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, criada em 1996 e vinculada atualmente ao Ministério do Desenvolvimento Regional. Somente a partir de 2004 incluiu os Diagnósticos do Manejo de Resíduos Sólidos em suas publicações. Sua base de dados possui uma robustez e uma cobertura de mais de 81% da população urbana. Suas pesquisas também são anuais e são utilizadas amplamente, inclusive pelo Sinir. O SNIS – Série Histórica fornece os indicadores anuais para seus três componentes: Água e Esgotos; Resíduos Sólidos Urbanos e Águas Pluviais (SNIS, 2004).

Essa pesquisa utiliza as definições aqui citadas pela PNRS e NBR 10004 (ABNT, 2004) assim como a base de dados do Sinir e SNIS.

3.2 COLETA SELETIVA NO BRASIL

A definição da coleta seletiva pela PNRS é categórica: “*coleta de resíduos sólidos previamente segregados conforme sua constituição ou composição*”. Fica a cargo dos municípios a responsabilidade pela implantação da coleta seletiva, estabelecer nos Planos Municipais de Gestão Integrada de resíduos sólidos as metas para a redução, reutilização, coleta seletiva e reciclagem, com o objetivo claro em reduzir o volume de rejeitos para a disposição final (BRASIL, 2010).

De acordo com os dados disponíveis, observa-se que a coleta seletiva ainda não é realidade em grande parte dos municípios e quando declarada não atinge a totalidade dos domicílios. Outro fator que não cumpre a premissa da coleta seletiva é a falta de segregação nos sistemas de entrega de resíduos recicláveis (secos e orgânicos), onde grandes volumes de resíduos ainda são recebidos misturados, diminuindo seu percentual de recuperação e aumentando o volume da disposição final (PLANARES, 2022).

A Figura 1 traz a evolução a nível nacional e regional a partir do ano de 2010, ano de criação da PNRS a 2019.

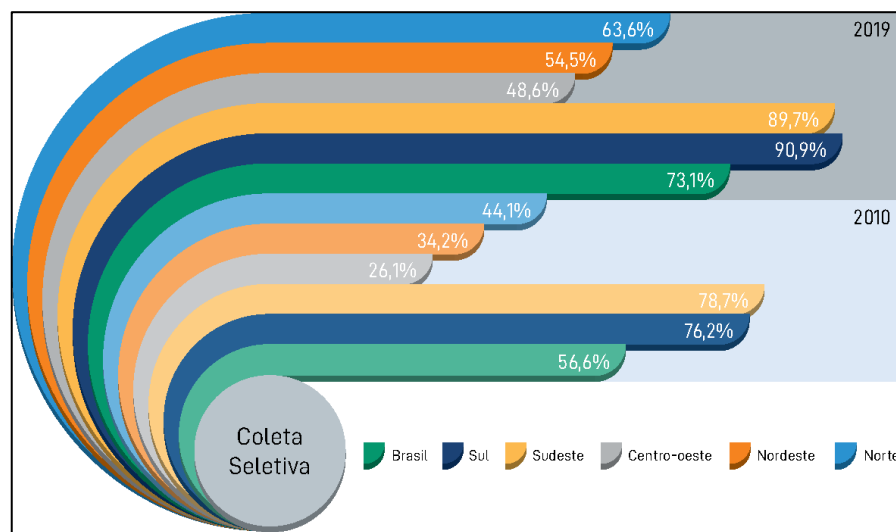


Figura 1 – Municípios com iniciativas de Coleta Seletiva (%)

Fonte: ABRELPE, 2020.

Os modelos da coleta seletiva podem variar de acordo com a necessidade e modelo de gestão de cada município. Os três modelos mais aplicados são a Coleta Seletiva Porta a Porta, em Postos de Entrega Voluntária e por Trabalhadores Autônomos, também denominada coleta informal. A seletiva porta a porta é realizada diretamente na fonte geradora. A segregação é realizada na fonte para serem recolhidos por veículos e pessoal preparados para essa função. Os Pontos de Entrega Voluntária são áreas em locais previamente preparados para receberem os resíduos. Nessa modalidade o gerador é responsável por encaminhar os recicláveis no local.

A coleta informal é realizada por meio dos catadores ou sucateiros que coletam diretamente o material.

A coleta seletiva por trabalhadores autônomos é realizada por catadores organizados ou não em associações ou cooperativas, com ou sem incentivo municipal. É por meio dos catadores que cerca de 90% dos resíduos são reciclados no Brasil, segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. O IPEA ainda aponta a realidade socioeconômica precária enfrentada pelas famílias dos trabalhadores, sendo o elo mais fraco na cadeia de valor da reciclagem, por isso a organização em cooperativas e associações é tão importante, logrando assim maior poder de negociação (IPEA, 2013).

3.2.1 Coleta Seletiva em Florianópolis

O Plano Municipal de Coleta Seletiva de Florianópolis, finalizado em 2016, define programas para atingir as metas de desvio do volume de rejeitos para o aterro sanitário através de cinco programas: Programa de Coleta Seletiva dos Resíduos Recicláveis Secos, Resíduos Recicláveis Orgânicos, Educação Ambiental, de Melhorias Gerenciais e Programa de Melhorias Operacionais.

Cada programa é sistematizado em Projeto, Etapas, Ação, Prazo e Custo. O Programa de Coleta Seletiva dos Resíduos Recicláveis Secos é dividido em seis projetos. Destaque para o Projeto de Inclusão Socioproductiva de catadores na triagem dos resíduos recicláveis secos, que reúne diversas ações no sentido de criar os grupos organizados em associações ou cooperativas, cursos de capacitação, criação de um grupo gestor especial para atuar junto às cooperativas/associações e melhorias no sistema de monitoramento sobre os quantitativos de resíduos recicláveis coletados e comercializados (PMF, 2016).

Outros dois projetos, ainda no Programa de Coleta Seletiva dos Resíduos Secos, também chamam a atenção. São eles: Projetos de Melhorias e Ampliações das Unidades de Triagem e Implantação da Usina de Triagem Mecanizada. Estão previstas ações nesses projetos como a execução de projeto semimecanizado nas unidades de triagem com um custo de R\$ 10.000.000,00 e implantar uma unidade de triagem mecanizada, com captação de recursos públicos ou privados para a elaboração do plano de negócios. Os catadores também estão no plano de ações para receberem inclusão e treinamento para a operação dos equipamentos da usina. O custo previsto para implementação desse projeto é de R\$ 26.000.000,00 (PMF, 2016).

O Programa de Coleta Seletiva dos Resíduos Orgânicos também sugere 6 projetos. Cabe destaque para o Projeto de Biodigestão, com ações voltadas para levantamento de projeto piloto de biodigestão em parceria com Universidade ou órgão de pesquisa, definindo a tecnologia a ser empregada no projeto piloto, com foco em viabilidade econômica, operacional e ambiental no município. O segundo projeto aqui mencionado é o de Compostagem na Fonte Geradora, o Projeto IPTU Verde e de Incentivo às Empresas de Compostagem. Outro projeto interessante é o de Incentivo à Agricultura Urbana, através da elaboração da Política Municipal de Agricultura Urbana (PMF, 2016).

O Quadro 1 e Quadro 2 trazem detalhes dos Projetos mencionados.

Quadro 1 - Sistematização do Programa de Coleta Seletiva dos Resíduos Secos.
Fonte: Adaptado do Plano Municipal de Coleta Seletiva (FLORIANÓPOLIS, 2016).

Programa	Projeto	Etapas	Ação	
PROGRAMA DE COLETA SELETIVA DOS RESÍDUOS SECOS	Projeto de Inclusão Sócioprodutiva de catadores na triagem dos resíduos recicláveis secos	Identificação de potenciais catadores para inserção no projeto	Levantamento do perfil socioeconômico de catadores autônomos e informais que atuam no município junto aos galpões e depósitos de sucateiros e similares, identificando interessados na inserção no processo de manejo. Poderá utilizar as agentes de saúde como instrumento de identificação dos potenciais trabalhadores.	
		Formalização de vínculo de trabalho dos catadores na etapa de triagem	Os catadores identificados na etapa anterior e interessados serão inseridos nas associações operantes ou formarão novos grupos organizados em associações ou cooperativas.	
		Capacitação técnica e operacional	Realizar cursos de capacitação técnica aos associados de forma continuada, visando garantias de aumento de produtividade e melhoria das condições de trabalho.	
		Monitoramento e Acompanhamento da produção dos catadores nas unidades de triagem	Criação de grupo gestor municipal para atuação específica junto às cooperativas/associações de catadores.	
		Monitoramento e Fiscalização ambiental de galpões de triagem ou depósitos sucateiros coleta seletiva informal	Realizar cadastro municipal sobre a atuação da coleta seletiva informal em galpões e depósitos existentes. Poderá utilizar o cadastro da Vigilância em endemias (VISA) como instrumento de reconhecimento da atuação de catadores informais e da existência de depósitos de materiais recicláveis. Criar instrumentos de monitoramento sobre os quantitativos de resíduos recicláveis secos são coletados pelos catadores informais e comercializados nesses galpões e depósitos.	
	Projetos de Melhorias e Ampliações das Unidades de Triagem	Melhorias Operacionais e de infraestrutura das unidades de triagem operados por Associações/cooperativas de catadores		Realizar levantamento atualizado das necessidades de cada unidade já operante em Florianópolis (ACMR, Recicla Floripa, AREsp).
				Elaboração de projetos executivos de melhoria da infraestrutura dessas unidades
				Elaboração de projeto de manutenção preventiva dos equipamentos existentes
				Identificar instituições e empresas para captar recursos e apoio financeiro e institucional na execução deste Projeto

Programa	Projeto	Etapas	Ação
			Execução projeto semi-mecanizado na(s) Unidade(s) de Triagem
		Regularização ambiental e operacional das Unidades de Triagem manual	Promover a regularização ambiental e operacional (habite-se, alvarás pertinentes e licenças ambientais) das unidades de triagem existentes.
		Promover a regularização ambiental e de funcionamento de galpões e depósitos reciclagem e sucateiros	Exigir a regularização de depósitos de triagem/reciclagem e galpões sucateiros existentes no município quanto a alvarás, licenciamentos ambientais, condições sanitárias, entre outras autorizações formais. Poderá estar vinculado a alvarás de funcionamento (regulamentação municipal).
		Implantação de Novas Unidades de Triagem	Ampliar a rede de unidades de triagem manual para atendimento às metas de desvio de resíduos secos com inserção de catadores informais
	Identificar instituições e empresas para captar recursos e apoio financeiro e institucional na execução deste Projeto		
Implantação da Usina de Triagem Mecanizada	Implantar unidade de triagem mecanizada da fração seca dos resíduos sólidos	Fomentar a captação de recursos que, poderão ser públicos ou privados, para elaboração do Plano de negócios e projetos da usina	
		Contratação dos projetos executivos para a Usina de triagem	

Quadro 2 - Sistematização do Programa de Coleta Seletiva dos Resíduos Orgânicos.

Fonte: Adaptado do Plano Municipal de Coleta Seletiva (FLORIANÓPOLIS, 2016).

Programa	Projeto	Etapas	Ação
PROGRAMA DE COLETA SELETIVA DOS RESÍDUOS SECOS	Projeto de Biodigestão	Planejamento e Projeto	Desenvolvimento de projeto de pesquisa para projeto piloto de unidade de biodigestão em parceria com Universidade ou órgão de pesquisa e aquisição de investimento financeiro institucional ou privado para projeto.
			Definição de tecnologia a ser utilizada no projeto de biodigestão piloto, vislumbrando viabilidade econômica, operacional e ambiental no município.
		Desenvolvimento	Desenvolvimento do Projeto Piloto no bairro Itacorubi
	Projeto de Compostagem na Fonte Geradora	Planejamento do Projeto	Definir os modelos de composteira que podem ser adotados para capacitações do Projeto (minhocários e outros)
			Fomento de parcerias institucionais e financeiras para apoio no desenvolvimento do projeto, inclusive com ONGs e grupos que já atuam em atividades similares no município. Inclusive para auxílio em oficinas e capacitações.
			Cadastramento de interessados para oficinas, cursos e capacitações visando a construção de composteiras domiciliares.
			Definir cronograma de oficinas e cursos para confecção de composteiras
		Execução do Projeto	Realização das oficinas, cursos e capacitações para confecção e operação de composteiras.
	Controle e Monitoramento	Monitorar e dar assistência técnica às composteiras operantes. Através de pessoal próprio (COMCAP)	

		e, principalmente através das parcerias e convênios com instituições e ONGs
Projetos de Incentivo às Empresas de Compostagem	Regulamentação	Elaboração de legislação que defina grandes e pequenos geradores no município e suas responsabilidades quanto à coleta seletiva de resíduos sólidos.
		Elaboração legislação ou similar sobre o manejo de resíduos verdes, dando responsabilidades ao manejo desses para grandes geradores.
		Elaboração de legislação ou normativa que regulamente a comercialização e atuação dessas empresas no âmbito municipal.
	Monitoramento e Controle	Definição de mecanismos de monitoramento quanto à atuação das empresas de modo a obter os quantitativos gerenciados e verificação junto às metas de desvio municipais.
		Exigir licenciamento ambiental e outras autorizações pertinentes dos pátios de compostagem privados
Projeto IPTU Verde	Elaboração e provação de lei municipal IPTU verde	--

A Figura 2 traz a concepção do modelo de coleta seletiva para Florianópolis.

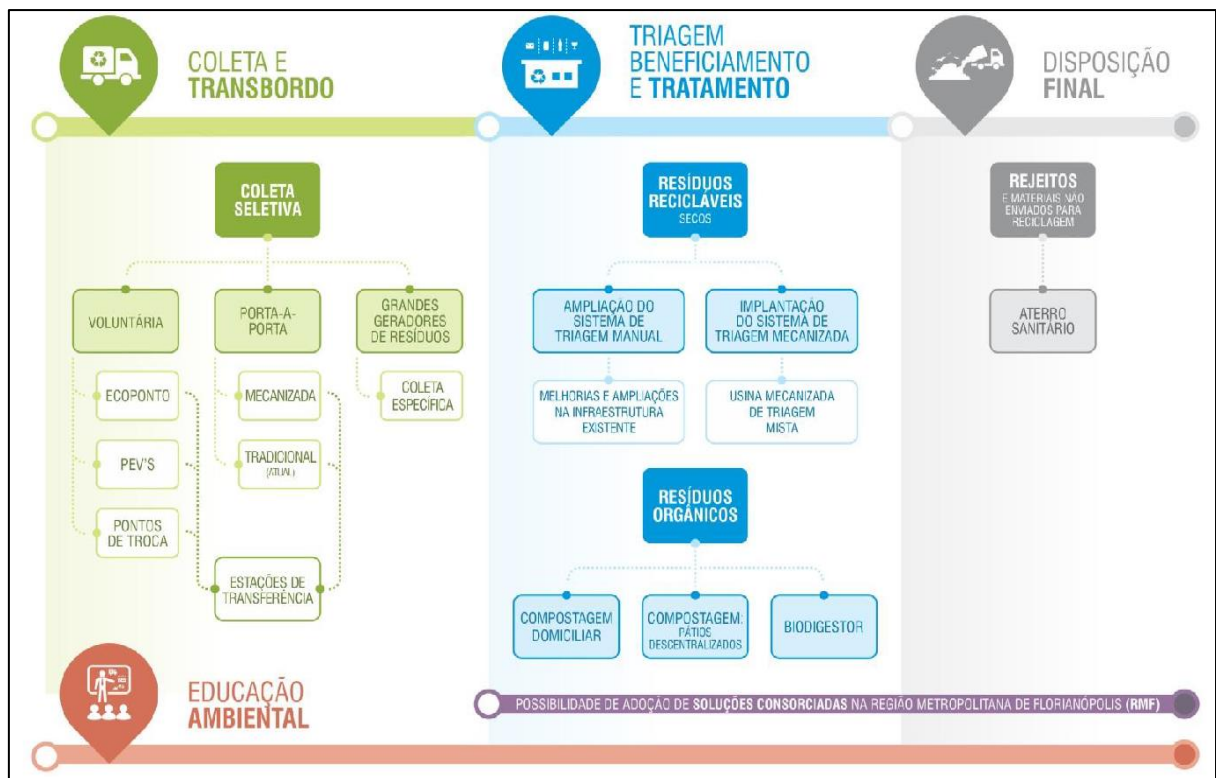


Figura 2 – Fluxograma geral do modelo de coleta seletiva no município de Florianópolis/SC. Fonte: Prefeitura Municipal de Florianópolis (2016)

A Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMMA), através da gestão de resíduos, avalia a melhora no desempenho da coleta seletiva em 2021. Para a fração de orgânicos, houve crescimento de 54% na quantidade de resíduos encaminhados para a compostagem e produção de cepilho em relação ao ano anterior. Ainda segundo a MMA a quantidade de rejeito enviado

ao aterro sanitário manteve-se em 188 mil toneladas em 2021, mesma quantidade que em 2020. A tendência de aumento não se concretizou pela melhora no desempenho da coleta seletiva (SMMA, 2022).

Além da gestão municipal, uma iniciativa por parte da Procuradoria da República de Santa Catarina, onde foi lançado um edital de chamamento público para selecionar Associação ou Cooperativa de Catadores de Materiais Recicláveis. O objetivo é habilitar e selecionar associações ou cooperativas para a realização da coleta seletiva dos resíduos produzidos pela Procuradoria da República no Estado de Santa Catarina. Para ser habilitada, a associação/cooperativa deve ser constituída exclusivamente por catadores que tenham a atividade como única fonte de renda e seja uma entidade sem fins lucrativos, com estrutura adequada e apresentarem sistema de rateio entre associados/cooperados. O edital foi lançado em setembro de 2022.

3.3 TIPOS DE TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A principal via de destinação dos RSU no Brasil ainda está centralizada em aterros controlados e sanitários. Serão apresentadas a seguir tipos de tratamento que podem trazer vantagens econômicas e ambientais na gestão dos RSU.

3.3.1 Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos

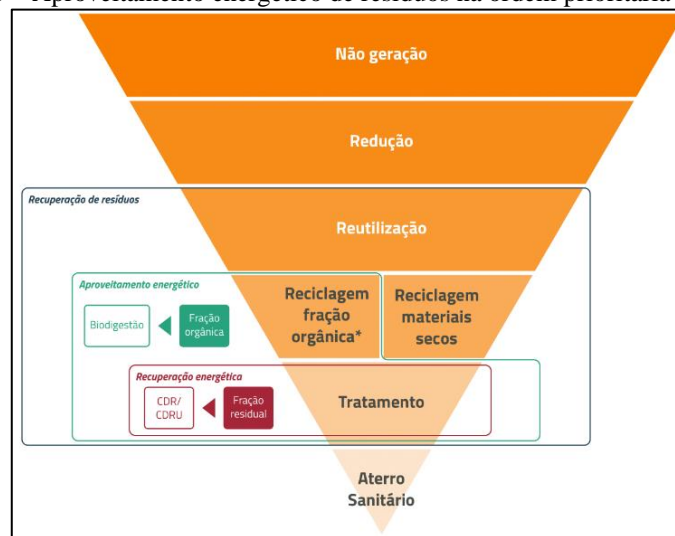
O Aproveitamento Energético de Resíduos (AER) recupera os resíduos que estariam em uma economia linear, sendo utilizados uma única vez e encaminhados para a destinação final. Com sua inserção na economia circular, os resíduos podem ser aproveitados em outras cadeias após seu uso originário, sendo renovados como insumos industriais. A recuperação pode ocorrer por meio da reciclagem da fração orgânica, através da biodigestão, ou resíduos secos tratados que seriam destinados aos aterros sanitários (INSTITUTO 17, 2022).

Incluindo a recuperação energética nos esforços de redução e reutilização dos resíduos, assim como o aperfeiçoamento da qualidade da destinação final, fomentando a economia circular, a recuperação energética torna-se uma importante estratégia para a gestão eficiente do RSU, podendo incrementar a oferta de energia mais próxima aos centros de consumo, gerando impactos sociais e ambientais positivos (INSTITUTO 17, 2022).

O aproveitamento energético está em voga no que se refere à gestão eficiente dos RSU. Os avanços tecnológicos na área e avaliações sobre seu impacto ambiental fazem os resíduos tornarem-se um recurso atrativo para a produção de energia elétrica.

A Figura 3 traz o aproveitamento energético inserido no contexto da ordem prioritária da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Percebe-se que a atuação do AER está focada na base da pirâmide, com rejeitos sendo desviados dos aterros sanitários. É importante destacar que a recuperação energética ocorre na fração residual, que é a parte de RSU não aproveitados depois da reciclagem tanto de orgânicos como de resíduos secos, por não ter viabilidade econômica ou tecnológica de reinserção na cadeia produtiva (INSTITUTO 17, 2022).

Figura 3 – Aproveitamento energético de resíduos na ordem prioritária da PNRS.



Fonte: Instituto 17 (2022)

O Planares traz duas diretrizes para o aumento do aproveitamento energético de Resíduos Sólidos. A Diretriz 5A visa estruturar o mercado de aproveitamento energético e possui quatro estratégias, mesmo número de estratégias da Diretriz 5B que tem como meta aumentar o aproveitamento energético de Resíduos Sólidos Urbanos (PLANARES, 2022).

As estratégias da Diretriz 5A, em linhas gerais, identificam as limitações e obstáculos da expansão da recuperação energética no país e da expansão do uso do biogás e biometano a partir do RSU, incentivar a produção e utilização de CDR e tornar permanente a energia gerada pelo RSU na matriz energética brasileira (PLANARES, 2022).

Para aumentar o aproveitamento energético, as estratégias da Diretriz 5B tratam da criação de políticas com o Ministério de Minas e Energia para a implantação de condições iniciais diferenciadas para a energia gerada pelo RSU, ser obrigatório nos novos aterros sanitários o aproveitamento energético do biogás, estimular o uso veicular de biometano e desenvolver juntamente com a iniciativa privada estudos de viabilidade técnica para o

aproveitamento energético em municípios e consórcios com mais de 100 mil habitantes (PLANARES, 2022).

O Aproveitamento Energético pode ser implementado através de diferentes tecnologias e utilizando distintas frações do RSU. As duas formas mais comuns de se produzir energia elétrica através de RSU são a incineração e o processamento biológico (CETESB, 2008).

A biodigestão é um processo biológico que utiliza a fração orgânica como insumo para a produção de energia e através dela produz-se o biogás que segundo a literatura pode chegar à ordem de 50% de CH₄ (EPE, 2008; USEPA, 2017).

O Aproveitamento Energético através do CDR se dá pelo processamento do RSU como combustível em fornos de cimento e centrais de energia elétrica (coprocessamento). O resultado da produção do CDR requer alto poder calorífico, baixos teores de cloro, enxofre e metais para que sejam ambiental e economicamente viáveis (MORETTO; FERNANDES, 2020).

3.3.2 Tratamento Biológico

Ao se controlar a decomposição da matéria orgânica evitando zonas anaeróbias, obtém-se redução nas emissões desse material. O tratamento biológico pode ser realizado por processos aeróbios simples ou através de um processo de biodigestão anaeróbia.

A compostagem pode ser compreendida como a produção de um composto de alta qualidade a partir da reciclagem do material orgânico, substituindo o fertilizante mineral, gerando benefícios com essa substituição. Existem muitas tecnologias que se aplicam para compostagem de alta qualidade, que podem ser de manejos mais simples como as leiras até a compostagem mecanizada. A grande eficiência desse tratamento se alcança com a segregação correta de resíduos de alimentos, jardins e parques (GIEGRICH, 2021).

A nível de Brasil, existem quatro sistemas de compostagem mais difundidos (GIEGRICH, 2021):

- Leiras estáticas com aeração passiva
- Leiras com rotação periódica
- Leiras com aeração forçada
- Compostagem em contêiner

Devido a imperfeições no processo, a compostagem também causa emissões de GEE, o que se compensa no benefício da substituição dos fertilizantes minerais, que são produzidos quimicamente e consomem muita energia na sua produção, o que eleva as taxas de emissões de GEE (GIEGRICH, 2021).

As emissões no processo da reciclagem se dão pela coleta e entrega do produto final através dos veículos que realizam essa logística, a segunda razão é a emissão da água e energia a partir do processo de compostagem e o terceiro motivo são as emissões fugitivas advindas da decomposição anaeróbica não intencional dentro do sistema aeróbico geral (California Environmental Protection Agency, 2017).

3.3.3 Produção de Biogás por meio da biodigestão anaeróbia

A digestão anaeróbia pode ser definida como a conversão de material orgânico em biogás na condição de ausência de oxigênio, o que também resulta em um composto estabilizado. Segundo Cuhls et al. (2015), medições realizadas de GEE resultaram em 2,6 kg CH₄/tonelada e 66 g N₂O/tonelada, o que totaliza uma emissão total de GEE de 90,2 kg CO₂ eq/tonelada de resíduo orgânico úmido na biodigestão anaeróbia com pós-tratamento fechado dos resíduos de fermentação. Quando a biodigestão não é realizada em sistema fechado, a emissão de GEE pode chegar a 227 kg CO₂ eq/tonelada de resíduo orgânico úmido, emissão 2,5 vezes maior que em sistemas fechados (GIEGRICH, 2021).

Uma fase de pré-tratamento da carga de entrada é necessária para grande parte dos sistemas de digestão anaeróbia. O teor de sólidos desejados é obtido pela diluição da carga dentro do digestor, em um tempo de retenção aproximado de 20 dias. Para manter a temperatura muitas vezes é utilizado um trocador de calor e para a diluição diferentes origens da água, como efluentes domésticos, água limpa ou até o líquido recirculante do efluente digestor (SOARES; MIYAMARU; MARTINS, 2017). A Figura 4 esquematiza um fluxo básico do sistema anaeróbio.

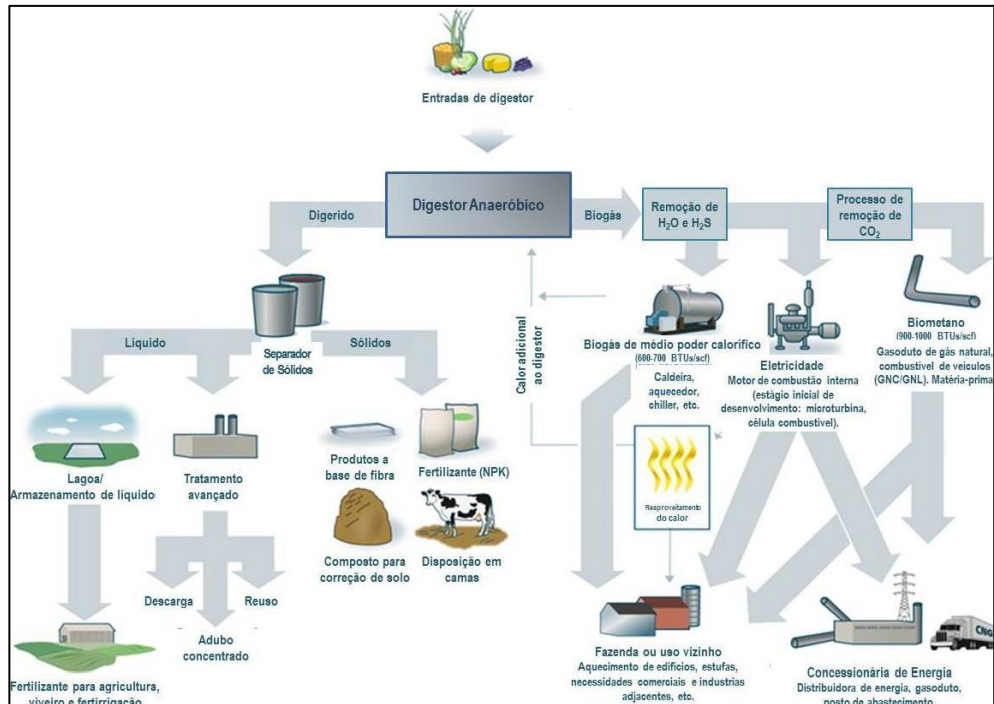


Figura 4 – Possibilidades de Aproveitamento através da biodigestão anaeróbica dos RSU.
Fonte: NGR/Instituto Via Pública – adaptado de EPA.

O biogás pode ser consumido diretamente, apresentando entre 19 e 25 MJ/Nm³ ou separado para aproveitamento do metano. Dependendo da composição do resíduo e considerando-se uma eficiência elétrica de 35% na conversão de energia térmica para energia elétrica, a cada tonelada de RSU podem ser obtidos de 50 a 150 kWh (SOARES; MIYAMARU; MARTINS, 2017).

3.3.4 Produção de Biogás em Aterros Sanitários

Por ser uma das principais formas de destinação final dos RSU, a recuperação do biogás em aterros sanitários pra fins energéticos é uma via atraente no viés econômico e ambiental, uma vez que a demanda por energia e combustíveis renováveis crescem assim como a preocupação global por sustentabilidade (CROVADOR *et al.*, 2017). O aproveitamento do biogás pode ser realizado no próprio local onde ele é gerado ou distribuído através de redes de distribuição de gás (RASI *et al.*, 2011)

A degradação da matéria orgânica nos aterros sanitários gera gases como o metano (CH₄), sendo 60 a 70% da composição, dióxido de carbono (CO₂), 30 a 40% da composição e

gases traço como nitrogênio (N₂), Hidrogênio (H₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S), amônia (NH₃) e vapor d'água (H₂O) (SILVA *et al.*, 2021).

A molécula de metano é 28 vezes mais nociva em relação ao potencial de aquecimento global, que é a probabilidade de uma molécula causar o aumento do efeito estufa, na equivalência com o CO₂, por isso a valorização através do aproveitamento energético do biogás em aterro sanitário, assim como as outras formas de tratamento, é tão relevante e vem de encontro com os preceitos da PNRS (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2022).

Quando não utilizado, recomenda-se que o biogás resultante dos aterros sanitários seja queimado, tendo o CO₂ como produto dessa queima. Porém, além de reduzir a emissão de GEE na redução de metano, o aproveitamento energético possui ainda a vantagem de criar receita através da energia gerada e também pelos créditos de carbono. As altas concentrações de metano também podem provocar a autoignição ou explosão. Os usos mais comuns do biogás são através de combustível em turbinas, motores a gás e caldeiras para a produção de energia elétrica. Quando purificado, aumentando a concentração de metano, pode ser também utilizado como combustível para veículos de transporte ou incluído em gasodutos juntamente com o gás natural (SOARES; MIYAMARU; MARTINS, 2017).

3.3.5 Tratamento Térmico

A geração de energia elétrica através da incineração dos RSU pode chegar de 400 a 700 kWh por tonelada em usinas de incineração. A capacidade de geração de energia elétrica depende diretamente da eficiência quanto à conversão da energia térmica em mecânica para acionar a turbina a vapor, que por sua vez aciona o gerador de energia elétrica. Essa conversão geralmente tem um rendimento relativamente baixo, entre 20 e 25% em processos denominados como *mass burning*, onde nenhum processo de tratamento é realizado previamente, incinerando os RSU da maneira que chegam à planta de incineração (SOARES; MIYAMARU; MARTINS, 2017).

A Figura 5 ilustra o processo de incineração através da tecnologia *mass burning*.

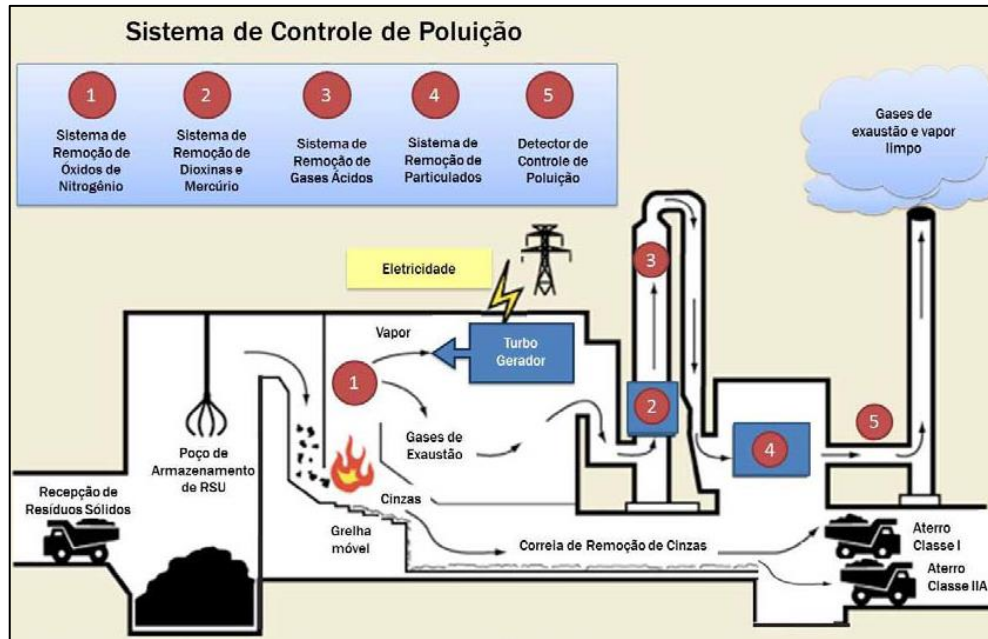


Figura 5 – Esquema do incinerador *mass burn*.
 Fonte: NGR/Instituto Via Pública – adaptado de EPA.

Além da produção de energia elétrica, uma planta de incineração pode gerar diretamente energia térmica. Esse duplo uso pode ser chamado de cogeração. Uma planta de cogeração apresenta vantagens ambientais ao substituir outras plantas mais poluentes ao mesmo tempo em que produz dois tipos de energia no mesmo local. As usinas WTE, sigla em inglês para *waste-to-energy*, do ponto de vista de mudanças climáticas, apresentam uma estratégia prática e sustentável de valorização dos RSU, sendo uma alternativa aos combustíveis fósseis (PANEPINTO; ZANETTI, 2018).

3.3.6 Combustível Derivado de Resíduos - CDR

O CDR necessita considerar características mínimas que atendam ao critério de escolha da melhor tecnologia disponível minimizando seus impactos ao meio ambiente e à saúde pública. Para a recuperação energética do CDR, as atividades de preparo precisam seguir condições operacionais, limites de emissão, critérios de controle e monitoramento para regular o licenciamento ambiental da atividade (Resolução SIMA 47/2020).

A Resolução SIMA 47/2020 considera como CDR apenas os resíduos que atendam os seguintes requisitos simultaneamente:

- I - tenham sido submetidos a alguma forma de separação prévia dos resíduos recicláveis para fins de atendimento ao artigo 9º da Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos);

- II - o ganho de energia seja comprovado; e
 - III - as condições do preparo e de utilização do CDR assegurem o atendimento aos critérios e parâmetros da presente Resolução.
- Parágrafo único - Considera-se o uso do CDR uma forma de destinação final de resíduos sólidos adequada, de prioridade inferior à reciclagem e superior ao tratamento.

O CDR tem grande potencialidade na indústria cimenteira, que utiliza combustíveis como carvão, petróleo, gás e coque de petróleo. As emissões globais de CO₂ chegam a uma faixa de 5 a 8% para a produção de cimento. A via alternativa de combustíveis nesse cenário, sendo o CDR destaque nas alternativas, visa solucionar problemáticas como o elevado consumo de energia, a variação do preço do petróleo e os impactos ambientais (CHAVES; SIMAN; CHANG, 2020).

Em termos de consumo, a indústria de cimento brasileira é considerada energeticamente eficiente, porém os combustíveis alternativos tem pouca utilização (Stafford *et al.*, 2016). A taxa de substituição térmica no coprocessamento no Brasil é de 11,9%, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2019). A taxa de substituição térmica em países mais desenvolvidos nessa tecnologia chega a 83% na Holanda, 63% na Áustria e 62% na Alemanha (CHAVES; SIMAN; CHANG, 2020).

A NBR 16.849 (ABNT, 2020), normatiza a cadeia de custódia de seleção, preparação e uso para fins energéticos dos resíduos sólidos urbanos, almejando o uso racional de resíduos na preparação e a escolha das tecnologias que satisfaçam as questões ambientais. Segundo a norma, os resíduos elegíveis para a preparação dos resíduos sólidos urbanos para fins energéticos – RSUE são os resíduos classe II – Não perigosos, respeitando a ordem de prioridade na gestão e gerenciamento dos RSU dos objetivos da PNRS. Além disso, o Anexo A lista a origem dos resíduos que são compatíveis para a elaboração do RSUE. Caso não esteja listado no Anexo A da norma, os resíduos devem:

- a) ser classificado como resíduo classe II - Não perigoso, de acordo com a ABNT NBR 10004;
- b) possuir PCI $\geq 2\ 750$ kcal/kg, base seca, e apresentar concentração de cloro $\leq 3\%$ (Cl $\leq 3,00\%$) e mercúrio ≤ 1 mg/kg (Hg ≤ 1 mg/kg).

Quanto à classificação, a NBR 16.849 (ABNT, 2020) determina três classes para três características principais:

- a) PCI na base seca;
- b) teor de cloro, como recebido;
- c) teor de mercúrio, como recebido.

A Tabela 1 traz as características de classificação dos RSU.

Tabela 1 – Limites para classificação dos RSU

Característica de classificação				
Unidade	Medida estatística	Classes		
PCI (base seca)		P1	P2	P3
kcal/kg	Limite inferior da média (P ≥ 95 %)	PCI ≥ 4 750	4 750 > PCI ≥ 3 580	3 580 > PCI ≥ 2 390
Teor de cloro		C1	C2	C3
%	Limite superior da média (P ≥ 95 %)	CI ≤ 0,5	0,5 < CI ≤ 1,5	1,5 < CI ≤ 3,0
Teor de mercúrio		H1	H2	H3
mg/kg	Média aritmética	Hg ≤ 0,1	0,1 < Hg ≤ 0,25	0,25 < Hg ≤ 0,5
	Percentil de 80	Hg _{P80} ≤ 0,2	0,2 < Hg _{P80} ≤ 0,5	0,5 < Hg _{P80} ≤ 1

Fonte: NBR 16.849 (ABNT, 2020).

3.4 EMISSÕES DE GEE NO MANEJO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Cada etapa na cadeia de geração, tratamento ou destinação dos RSU envolvem processos que inevitavelmente causam emissão de GEE. O grande desafio da gestão no manejo de resíduos sólidos está em mitigar tais impactos e oferecer o maior ganho social, ambiental e econômico. Através de muitas pesquisas ao longo das últimas décadas, focadas em explorar o comportamento dos diferentes GEE em relação ao CO₂, proporcionam atualizações dos fatores de equivalência que determinam a quantidade equivalente de CO₂.

As publicações do IPCC ao longo dos anos tiveram uma evolução quanto aos fatores de multiplicação para o Potencial de Aquecimento Global (GWP). O GWP é uma medida que mostra quanto uma certa massa de um gás de efeito estufa é capaz de reter calor na atmosfera, comparando-a com a mesma massa de gás equivalente ao CO₂. A Tabela 2 traz os fatores referentes aos relatórios de avaliação do IPCC.

Tabela 2 – Fatores de Multiplicação para o Potencial de Aquecimento Global
Fonte: (Brasil, 2021).

		Metano Fóssil	Metano Renovável	Óxido nitroso	Referência
Segundo	Relatório de	21	21	310	(IPCC, 1996)
Avaliação					

	Metano Fóssil	Metano Renovável	Óxido nitroso	Referência
Terceiro Relatório de Avaliação	23	23	296	(IPCC, 2001)
Quarto Relatório de Avaliação	25	25	298	(IPCC, 2007)
Quinto Relatório de Avaliação	30	28	265	(IPCC, 2013)

A geração de CO₂ pela oxidação do metano na atmosfera distingue-se na fonte. O produto da oxidação do CO₂ de uma fonte fóssil contribui para o efeito estufa, além do metano fóssil, enquanto o CO₂ da fonte renovável não.

Na modelagem dos processos na gestão dos resíduos referentes à reciclagem considera-se os processos desde a coleta até a fabricação do produto final que chega ao mercado novamente. O material recuperado substitui a cadeia de esgotamento de matéria-prima para fabricação de produtos primários, os que são fabricados diretamente de um recurso natural. Para se medir o ganho na fabricação dos produtos secundários, que são os materiais recuperados pela reciclagem, é necessário que todas as emissões de ambos os processos, recuperação e produção primária, sejam levadas em conta.

Para a gestão dos RSU, adota-se dados sobre toda a estrutura do sistema de reciclagem relacionada ao tipo de material, tecnologia a ser adotada na recuperação assim como a qualidade do material a ser recuperado e seus benefícios na substituição do material primário. As emissões causadas pelo sistema são consideradas como débitos. Os créditos são as emissões contabilizadas causadas pela produção equivalente do material primário. Todas essas informações são obtidas para cada fração de resíduo reciclável, como papel, vidro metal etc. A Tabela 3 demonstra os fatores de emissão específicos.

Tabela 3 – Fatores de emissão de matérias recicláveis

kg CO ₂ eq/t Resíduo	Resíduo orgânico		Papel e Papelão	Vidro	Metais ferrosos	Alumínio	Plástico
	Biodigestão	Compostagem					
Emissões (produção primária)	90	95	1.256	483	64	697	410
Emissões (produção secundária)	24	24	1548	604	1.712	9.880	1.910
Resultado líquido	66	71	-292	-121	-1648	-9.183	-1.500

Fonte: (Brasil, 2021)

Os inventários de emissões são muito utilizados na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida. A Tabela 4 detalha algumas das emissões para os dados utilizados no artigo de Liikanen et al., (2018) para compostagem e digestão anaeróbia.

Tabela 4 – Dados no tratamento de resíduos orgânicos

Parâmetro/processo	Valor	Unidade	Referência
Compostagem doméstica			
Emissões de CH ₄	2.3	g _{CH4} /kg _{RO}	(Andersen et al., 2012)
Emissões de N ₂ O	0.4	g _{CH4} /kg _{RO}	(Andersen et al., 2012)
Substituição de NPK	2.9	kg/t _{RO}	(Boldrin et al., 2009)
Planta de compostagem (leiras)			
Emissões de CH ₄	2.5	% C degradado	(Boldrin et al., 2009)
Emissões de N ₂ O	0.7	Do N de entrada	(Boldrin et al., 2009)
Emissões de NH ₃	1.4	g/kg(N)	(Pagans et al., 2006)
Substituição de NPK	2.9	kg/t _{RO}	(Boldrin et al., 2009)
Consumo de diesel por trator	5	dm ³ /t _{RO}	(Brown et al., 2008)
Emissão de CO por trator	7.8	g/dm ³ _{diesel}	(Lipasto, 2012)
Emissão de HC por trator	2.5	g/dm ³ _{diesel}	(Lipasto, 2012)
Emissão de NO _x por trator	22	g/dm ³ _{diesel}	(Lipasto, 2012)
Emissão de SO ₂ por trator	0.017	g/dm ³ _{diesel}	(Lipasto, 2012)
Emissão equivalente de SO ₂ por trator	2632	g/dm ³ _{diesel}	(Lipasto, 2012)
Planta de Digestão Anaeróbia			
Rendimento/geração de CH ₄	0.33	m ³ /kg _{sólidos voláteis}	(Angelidaki et al., 2006; Berglund and Börjesson, 2006)
Consumo de eletricidade	0.07	MJ/kg _{RO}	(Berglund and Börjesson, 2006)
Teor de umidade em um reator de biogás	90	%	(Havukainen et al., 2017)
Eficiência elétrica da combustão de biogás	40	%	(Havukainen et al., 2017)
Eficiência na produção de calor	40	%	(Havukainen et al., 2017)
Emissões de CH ₄ da combustão do biogás	0.434	g/MJ	(Nielsen et al., 2010)
Emissões de N ₂ O da combustão do biogás	0.0016	g/MJ	(Nielsen et al., 2010)
Consumo de eletricidade da desidratação do digerido	0.015	MJ/kg _{digerido}	(Møller et al., 2002)
Eficiência de separação de sólidos totais na desidratação	61.7	%	(Møller et al., 2002)
Teor de sólidos totais na fração seca	30.0	%	(Møller et al., 2002)
Eficiência de separação de N no desaguamento	26.1	%	(Møller et al., 2002)

Legenda: RO = resíduos orgânicos

Fonte: Adaptado de (LIIKANEN *et al.*, 2018).

3.5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV – NO MANEJO DE RSU NO BRASIL

A ACV é um método que permite estimar os impactos ambientais de produtos ou sistemas. No campo da gestão dos RSU, a ACV é uma técnica amplamente utilizada na análise

dos impactos ambientais na cadeia dos RSU, tornando-se uma poderosa ferramenta para a tomada de decisões (LIIKANEN *et al.*, 2018).

3.5.1 Histórico

Primeiramente denominada como “análises de recursos” ou “análises de perfil ambiental”, no início dos anos 60 por pressão dos ambientalistas nos Estados Unidos, quantificavam o consumo de energia dos processos industriais e para isso era preciso calcular o balanço da massa das matérias-primas e recursos necessários. O primeiro registro público do processo foi desenvolvido pela Coca-Cola em 1965, para comparar e decidir sobre os tipos de embalagem que apresentavam melhor desempenho na preservação ambiental e de recursos naturais. O estudo levava em conta a quantificação de emissões e recursos naturais utilizados pela empresa (SANTOS, 2011).

Esse estudo pioneiro, denominado *Resource and Environmental Profile Analysis - (REPA)*, foi aprimorado pelo *Midwest Research Institute – MRI*, o mesmo que havia elaborado o REPA, durante a realização de outros estudos para a Agência de Proteção Ambiental Americana – EPA. A evolução dessas análises deu origem ao que hoje é conhecido por Avaliação do Ciclo de Vida – ACV (MOURAD *et al.*, 2002).

A partir dos anos 80, além do consumo de recursos e energia, a quantificação das emissões atmosféricas, na água e solo começam a ganhar força no cenário mundial, inclusive com a realização de diversos acordos internacionais para a proteção à camada de ozônio e a redução do efeito estufa. A popularização das Avaliações do Ciclo de vida traz para os anos 90 uma crescente na criação de bancos de dados que serviam de base para os estudos assim como os primeiros *softwares* específicos desenvolvidos para a realização das pesquisas.

A ACV no que se refere à gestão dos resíduos começa a ser difundida mundialmente a partir da metade da década de 90. Um mapeamento de estudos relevantes realizado por Laurent *et al.* (2014) traz dados sobre o crescimento na publicação de artigos no setor de gestão de resíduos a partir de 1995, como mostra a Figura 6.

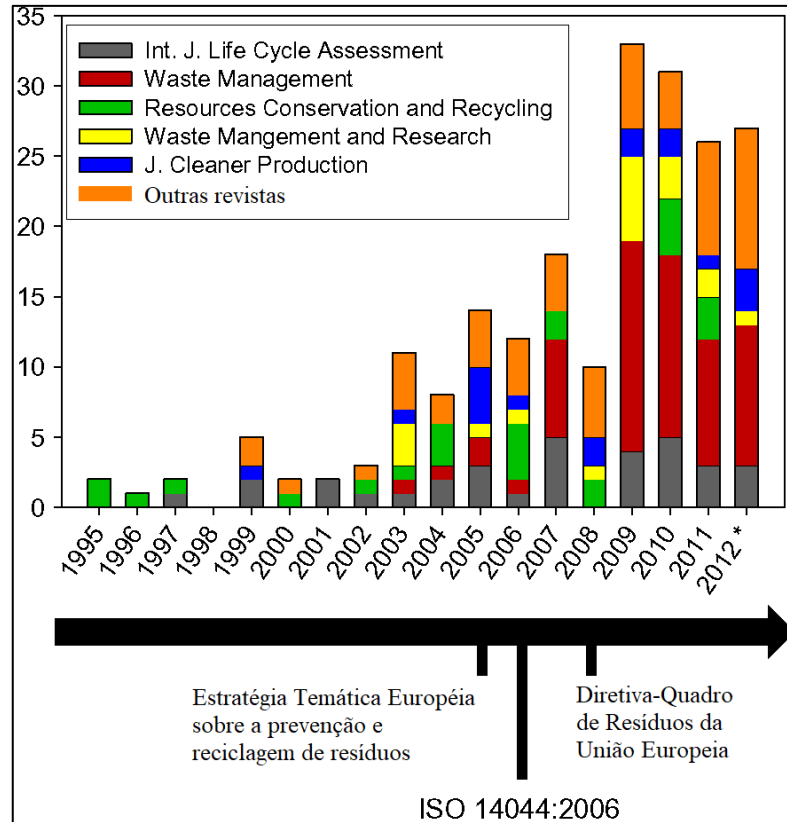


Figura 6 – Distribuição das publicações relacionadas ao setor de gestão de resíduos utilizando a ACV, classificada por Revistas.
Fonte: LAURENT *et al.*, (2014)

A evolução no número de publicações revela a aceitação da metodologia na análise da performance ambiental na gestão dos RSU. A partir da implementação da ISO 14044, que estabelece padrões para a metodologia de ACV, o número de estudos seguiu uma tendência de aumento (LAURENT *et al.*, 2014).

3.5.2 Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)

Organizada pela Cooperação para a proteção do clima na gestão dos resíduos sólidos urbanos – ProteGEEr, coordenado no Brasil pela Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) em parceria com a Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, a calculadora foi elaborada para apoiar a tomada de decisões na gestão baseando-se nas emissões geradas no manejo dos RSU. Foi desenhada para a utilização no Brasil a partir dos municípios, estados, consórcios e governo federal (BRASIL, 2021).

A calculadora é parte de um conjunto de ferramentas que dão apoio à gestão municipal. São nove ferramentas compostas por guias, roteiros e planilhas de cálculo que tratam os

principais temas que dependem de embasamento para a tomada de decisão, como encerramento de lixões, coleta seletiva, formação de consórcio público, cobrança pelos serviços, emissões de GEE, rotas tecnológicas e custos de investimento e operação. Todas foram testadas e validadas em vários municípios-piloto antes de serem publicadas (BRASIL, 2021).

A escolha pela ferramenta se deu por ela ter sido elaborada voltada a atender as especificidades brasileiras, por seu recente lançamento (2021) e por fazer parte de um conjunto de ferramentas de apoio à gestão de resíduos sólidos urbanos. As ferramentas foram testadas e validadas em municípios-piloto para ser lançadas e aproveitadas na melhoria da gestão dos resíduos sólidos.

As premissas da Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)¹ levam em consideração a relação entre as emissões de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) no manejo dos resíduos, em processos aeróbios ou anaeróbios, com o CO₂ nas mudanças climáticas. Os fatores de multiplicação sofreram muitas atualizações para se determinar a quantidade equivalente de CO₂ para o Potencial de Aquecimento Global (GWP). A calculadora utiliza os fatores mais recentes fornecidos pelo Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas – IPCC. Em alguns processos podem ser utilizados fatores mais antigos são incorporados (BRASIL, 2021).

Para as atividades de reciclagem, os cálculos variam dependendo do tipo e material a ser reciclado. Utilizando a abordagem da ACV, são modelados todos os processos desde a coleta dos resíduos até a venda do material no mercado. Todas as emissões de GEE dos processos de recuperação e as emissões dos processos de produção primária são quantificadas para calcular o balanço líquido de GEE para cada opção de reciclagem, levando em conta a realidade brasileira sempre que possível e na sequência informações preferencialmente da América Latina e outras regiões se necessário (BRASIL, 2021).

Todos os resultados dos processos da calculadora: Reciclagem, tipos de tratamento e disposição final no solo levam em consideração as emissões inerentes ao próprio processo e do consumo de energia utilizado para operá-lo (BRASIL, 2021).

¹ Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/ptbr/assuntos/saneamento/proteger/lista-completas-ferramentas-para-gestao-rsu>

4 METODOLOGIA

Esse estudo foi elaborado com base nos resultados obtidos através da criação de cenários levando em consideração tendências na gestão de resíduos sólidos assim como resultados de artigos científicos publicados na área. Para o município de Florianópolis, o Plano Municipal de Coleta Seletiva foi base para a composição do cenário atual e também o cenário com as diretrizes de melhora na gestão, como o programa Floripa Lixo Zero 2030.

Para a obtenção dos resultados foi utilizada a Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil, parte do conjunto de ferramentas de apoio à gestão municipal, lançada em 2021 e com o objetivo de auxiliar gestores na tomada de decisão em temas urgentes no que diz respeito à gestão de RSU.

A Figura 7 ilustra as etapas realizadas para a elaboração do trabalho.



Figura 7 – Etapas da elaboração do trabalho

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 8 traz um fluxograma resumido das rotas dos resíduos em cada cenário.

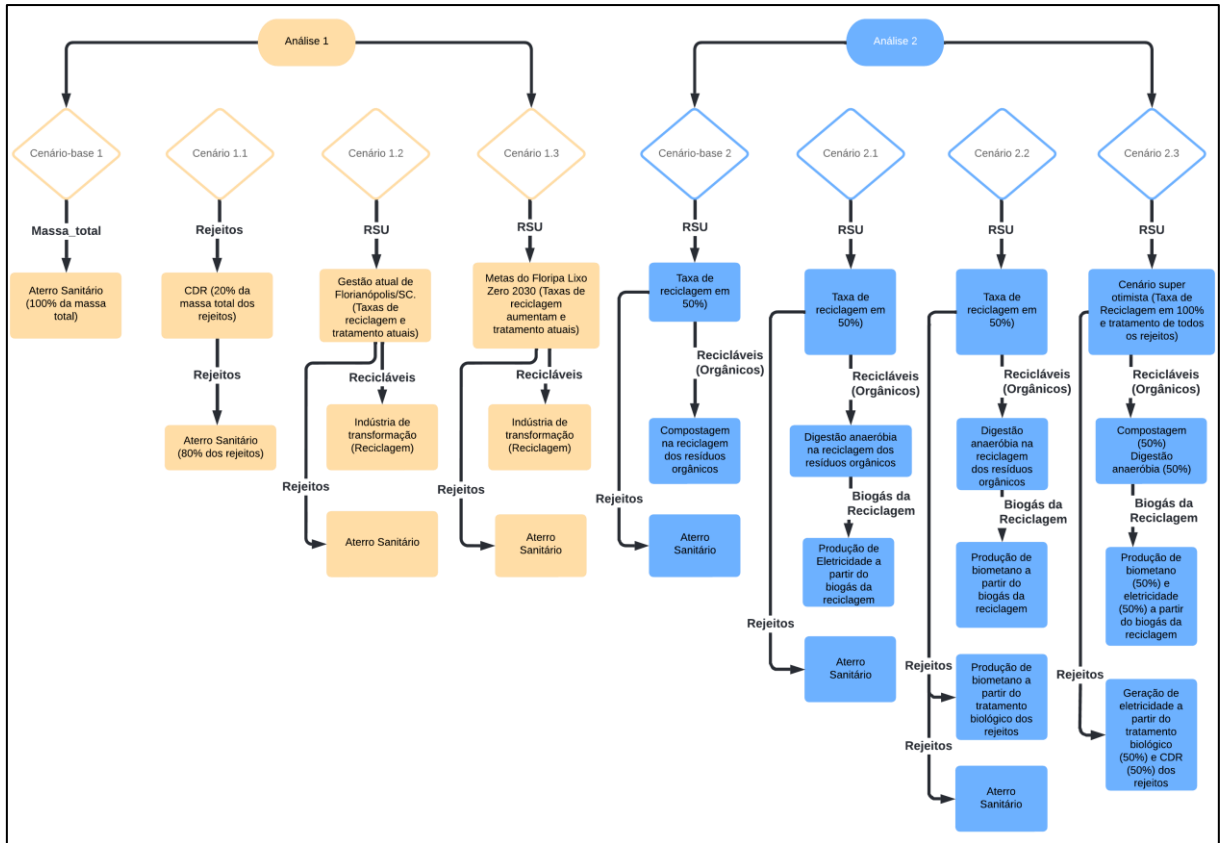


Figura 8 – Fluxograma dos cenários.
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

Capital do estado de Santa Catarina, Florianópolis possui uma área territorial de 674.844 km², concentrada em sua porção insular, e uma pequena porção na parte continental. População estimada em 516.524 em 2021 e um PIB per capita de R\$43.842,54 em 2019 para um Índice de desenvolvimento humano municipal - IDHM - de 0,847 em 2010. (IBGE, 2022)

O órgão responsável pela coleta dos RSU é a Secretaria Municipal de Habitação e Saneamento (SMHSA) através da COMCAP, autarquia administrada pelo município, que terceirizou o serviço que faz a coleta do norte da ilha e em uma parte continental.

A coleta seletiva é realizada na modalidade porta a porta, através dos Pontos de Entrega Voluntária (PEVs), nos Ecopontos. Em julho de 2022, a Prefeitura Municipal de Florianópolis (PMF), ampliou horários da coleta seletiva em alguns bairros, a fim de se alcançar as metas do projeto Floripa Lixo Zero 2030, que pretende reduzir a emissão de CO₂ equivalente. Alguns bairros já contam com coletas seletivas diferenciadas por materiais em alguns dias da semana,

como a coleta seletiva mista e a seletiva flex Floripa só vidro. Também há coletas somente de material orgânico.

4.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS

Os dados referentes aos resíduos para a estimativa de emissões de CO₂ foram levantados através do Plano Municipal de Coleta Seletiva (PMCS), elaborado em 2014 através de convênio realizado entre a Prefeitura Municipal de Florianópolis (PMF), Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Caixa Econômica Federal (CEF). O Plano tem como alguns de seus objetivos o diagnóstico da situação da coleta seletiva naquele ano, estudos para a elaboração do PMCS e elaborar o modelo da coleta seletiva. Os dois estudos qualitativos anteriores nesse sentido foram realizados em 1988 pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC e em 2002 pela Centro Federal de Santa Catarina – CEFET/SC, UFSC e a empresa Tractebel Energia S.A, os dois estudos foram realizados em parceria com a COMCAP (PMF, 2016).

Os objetivos específicos do estudo além da caracterização qualitativa dos resíduos da coleta seletiva, incluem a caracterização qualitativa da coleta convencional nos distritos de Florianópolis. A Tabela 5 traz a caracterização gravimétrica para a coleta seletiva de Florianópolis para o ano de 2014.

Tabela 5 – Peso por Material da Coleta Seletiva de Florianópolis (ano base 2014)

Produto	Sub-produto	Percentual total	Peso Total (kg.ano⁻¹)
Resíduo orgânico	Poda e Capina	0,18%	17.106
	Alimentos	1,12%	107.079
Papel		2,91%	277.809
Papelão		9,14%	872.527
Papel Misto		26,80%	2.559.350
Plásticos Moles	PEAD	0,28%	26.336
	PVC	0,47%	44.564
	PEBD	10,24%	977.327
	PP	0,18%	16.713
	PS	0,06%	5.641
	EPS	0,00%	0
	Plástico Metalizado	0,56%	53.084
Plásticos Duros	PET	5,39%	514.378
	PEAD	2,26%	215.925
	PVC	0,41%	38.712
	PEBD	0,10%	9.983
	PP	3,56%	340.135
	PS	1,00%	95.151
	EPS	0,38%	36.397
	Plástico Metalizado	0,00%	55
	Outros	0,19%	18.443

Produto	Sub-produto	Percentual total	Peso Total (kg.ano⁻¹)
Vidro		16,73%	1.597.210
Tetrapack		2,69%	256.894
Metais	Alumínio	1,35%	129.192
	Ferro	2,14%	204.109
	Outros	0,00%	0
Madeira		0,12%	11.521
Têxteis, Trapo, Couro		2,95%	281.717
Tóxicos	Pilhas, Baterias e Lâmpadas	0,40%	38.205
Infecantes		1,64%	156.353
Fraldas e Resíduo sanitário		0,81%	77.544
Resíduos da Construção Civil		0,08%	7.816
Borracha		0,24%	22.982
Eletrônicos		4,48%	428.021
Outros		1,15%	110.278
Total		100,00%	9.548.555

Fonte: Prefeitura Municipal de Florianópolis, 2014

A Tabela 6 mostra o resultado da composição gravimétrica de todos os Resíduos Sólidos de Florianópolis no ano de 2014.

Tabela 6 - Peso Total por Material de Florianópolis (kg.ano⁻¹ : Ano base: 2014)

Produto	Sub-produto	Percentual total	Peso Total (kg.ano⁻¹)
Resíduo Orgânico	Poda e Capina	11,19%	18.328.110
	Alimentos	23,66%	38.750.579
Papel		2,30%	3.771.290
Papelão		5,20%	8.524.683
Papel Misto		8,58%	14.052.477
Plásticos Moles	PEAD	4,90%	8.023.087
	PVC	0,52%	858.362
	PEBD	5,79%	9.491.734
	PP	0,02%	30.634
	PS	0,00%	5.641
	EPS	0,00%	0
	Plástico Metalizado	0,68%	1.108.827
Plásticos Duros	PET	3,07%	5.020.973
	PEAD	0,57%	941.303
	PVC	0,29%	473.771
	PEBD	0,02%	39.518
	PP	1,20%	1.959.360
	PS	0,72%	1.183.425
	EPS	0,66%	1.084.825
	Plástico Metalizado	0,03%	55.262
	Outros	0,01%	21.345
	Vidro		4,04%
Tetrapack		1,39%	2.282.211
Metais	Alumínio	0,65%	1.060.975
	Ferro	1,94%	3.170.823
	Outros	0,01%	11.892
Madeira		0,37%	610.451
Têxteis, Trapo, Couro		4,17%	6.830.366

Produto	Sub-produto	Percentual total	Peso Total (kg.ano⁻¹)
Tóxicos	Pilhas, Baterias e Lâmpadas	0,03%	49.437
Infectantes		0,53%	870.618
Fraldas e lixo sanitário		15,85%	25.960.494
Resíduos da Construção Civil		0,19%	303.406
Borracha		0,47%	772.366
Eletrônicos		0,86%	1.401.045
Outros		0,08%	133.389
Total		100%	163.802.073

Fonte: Prefeitura Municipal de Florianópolis, 2014

A gravimetria dos resíduos totais para a entrada de dados na calculadora foi adaptada a partir da Tabela 6 de acordo com o *input* necessário para rodar a análise da ferramenta. A Tabela 7 mostra como foi adaptada a gravimetria do Plano Municipal da Coleta Seletiva para a inserção na Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil.

Tabela 7 - Gravimetria dos resíduos totais adaptada para a entrada de dados na calculadora

Componentes	Produtos ou subprodutos da Tabela 6	Percentual (%)
Resíduos de alimentos	Subproduto alimentos	23,66
Resíduos de jardins e parques	Subproduto Poda e Capina	11,19
Papel, papelão	Soma de Papel, papelão, papel misto e tetrapack	17,47
Plásticos	Soma de plástico moles e duros	18,48
Vidros	Vidro	4,04
Metais ferrosos	Soma dos subprodutos ferro e outros	1,95
Alumínio	Subproduto alumínio	0,65
Têxteis	Têxteis, Trapo, Couro	4,17
Borracha, couro	Borracha	0,47
Fraldas (descartáveis)	Fraldas e lixo sanitário	15,85
Madeira	Madeira	0,37
Resíduos minerais	-	0,00
Outros	Soma de Infectantes, Resíduos da Construção Civil, Eletônicos e outros	1,70
	Total	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

A gravimetria dos materiais recicláveis para a entrada de dados na calculadora foi adaptada a partir da soma dos pesos dos produtos ou subprodutos da Tabela 5 e relacionadas em proporção com o peso total dos resíduos da Tabela 6. A Tabela 8 demonstra os percentuais obtidos para a inserção na Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil.

Tabela 8– Gravimetria dos recicláveis adaptada para a entrada de dados na calculadora

Tipo de material para reciclagem	Produtos ou subprodutos da Tabela 5	Percentual (%)
Papel, papelão	Soma de Papel, papelão, papel misto e tetrapack	2,42
Plásticos	Soma de plástico moles e duros	1,46
Vidros	Vidro	0,98
Metais ferrosos	Soma dos subprodutos ferro	2,14
Alumínio	Subproduto alumínio	1,35
Têxteis	Têxteis, Trapo, Couro	0,17
Resíduos de alimentos	Subproduto alimentos	0,06
Resíduos de jardins e parques	Subproduto Poda e Capina	0,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 ESTIMATIVA DE EMISSÕES: FERRAMENTA DE CÁLCULO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) NO MANEJO DE RSU PARA O BRASIL

A Calculadora de emissões de GEE para resíduos: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil – Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), foi elaborada em *software* Microsoft Excel. A planilha possui 10 abas e é acompanhada por um manual direciona o correto uso de cada uma delas, assim como as prerrogativas utilizadas na elaboração dos cálculos das emissões de CO₂ equivalente. A seguir, a identificação e o resumo de cada aba:

- **Intro:** Informações referentes à elaboração da ferramenta e breve comentário sobre as abas e função da calculadora.
- **Início:** Inserção da quantidade total de resíduos, composição gravimétrica, teor de água e Fator de Emissão de GEE específico para geração de eletricidade.
- **Reciclagem:** Nessa aba, insere-se a porcentagem de material utilizado na reciclagem em relação ao peso total coletado. É dividido em materiais secos e orgânicos. É possível ainda indicar a parcela de resíduos orgânicos reciclados por compostagem ou digestão anaeróbia. Para a digestão anaeróbia, há a opção em direcionar a fração para a produção de eletricidade ou de biometano.
- **Destinação:** Define-se aqui o tipo de tratamento e disposição final de resíduos. As opções variam de queima aberta de resíduos dispersos a aterro sanitário com possibilidade de coleta de gás e também opções de recuperação através de CDR
- **Resultados:** Existem 5 abas de resultados na ferramenta, uma para cada cenário que totalizam 4 e uma aba para todos os resultados, onde são contabilizados os débitos e créditos separados por processos de reciclagem, destinação e RSU total.

- **Cálculos:** Nesta aba está todo o referencial teórico para o cálculo das emissões de CO₂ equivalente. Existe a possibilidade de se atualizar alguns referenciais caso haja especificidades por região ou até atualização de fatores.

A ferramenta pode ser acessada e obtida através do site <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/protegeer/lista-completa-das-ferramentas-para-gestao-rsu>. Também se encontram outras ferramentas complementares que auxiliam na gestão de RSU.

A Calculadora possui breves instruções através de comentários ou textos em células específicas. Todos os dados levantados como a gravimetria, quantidades e tipos de tratamento devem ser inseridos nas células verdes.

A Figura 9 mostra a visão geral da Calculadora.

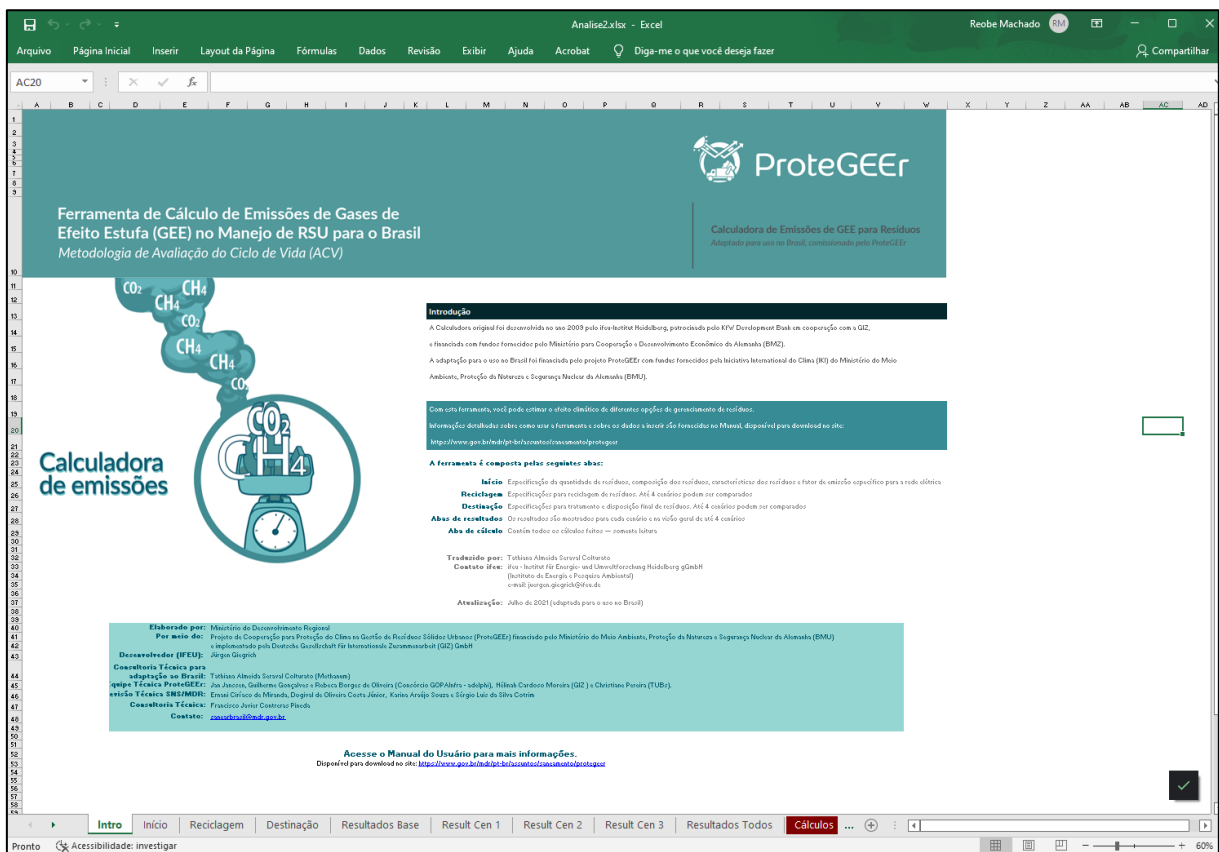


Figura 9 – Visão geral da calculadora.
Fonte: Brasil (2021)

A Figura 10 mostra as instruções iniciais que o Manual da Ferramenta de GEE apresenta.

As planilhas seguintes são destinadas à **entrada de dados** por parte do usuário, representando os cenários de gestão de resíduos sólidos que serão objeto de quantificação de emissões:

Aba Início Especificação da quantidade de resíduos, composição dos resíduos, características dos resíduos e matriz energética específica da região.

Aba Reciclagem Especificações para as opções de reciclagem de resíduos (secos e orgânicos). Até quatro cenários (incluindo o Cenário-base) podem ser definidos e comparados.

Aba Disposição Especificações para as opções de recuperação e/ou disposição do RSU residual (quantidade restante de resíduos após a reciclagem). Novamente, podemos definir e comparar até quatro cenários (incluindo o Cenário-base).

As abas subsequentes apresentam os resultados relacionados aos cenários propostos:

Resultados Base Resultados do Cenário-base

Result Cen1 Resultados do Cenário 1

Result Cen2 Resultados do Cenário 2

Result Cen3 Resultados do Cenário 3

Resultados Todos: Comparação resumida dos resultados dos cenários definidos. As planilhas são explicadas com mais detalhes nas seções a seguir.

Figura 10 – Instruções de uso no Manual da Calculadora.

Fonte: Brasil (2021)

4.4 ANÁLISES REALIZADAS

A ferramenta possibilita a criação de 4 cenários em cada simulação, cujos resultados são mostrados nos gráficos lado a lado para cada cenário. Foram realizadas duas análises, resultando em 8 cenários. A Figura 11 e Figura 12 resumem os cenários para cada análise.

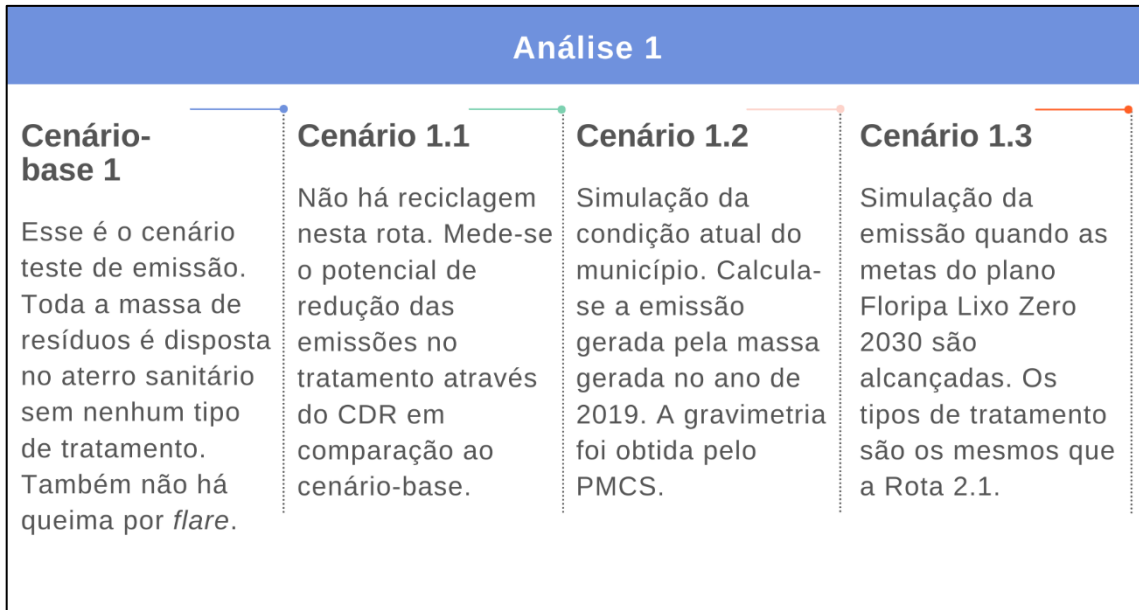


Figura 11 – Resumo da Análise 1

Fonte: Elaborado pelo autor.

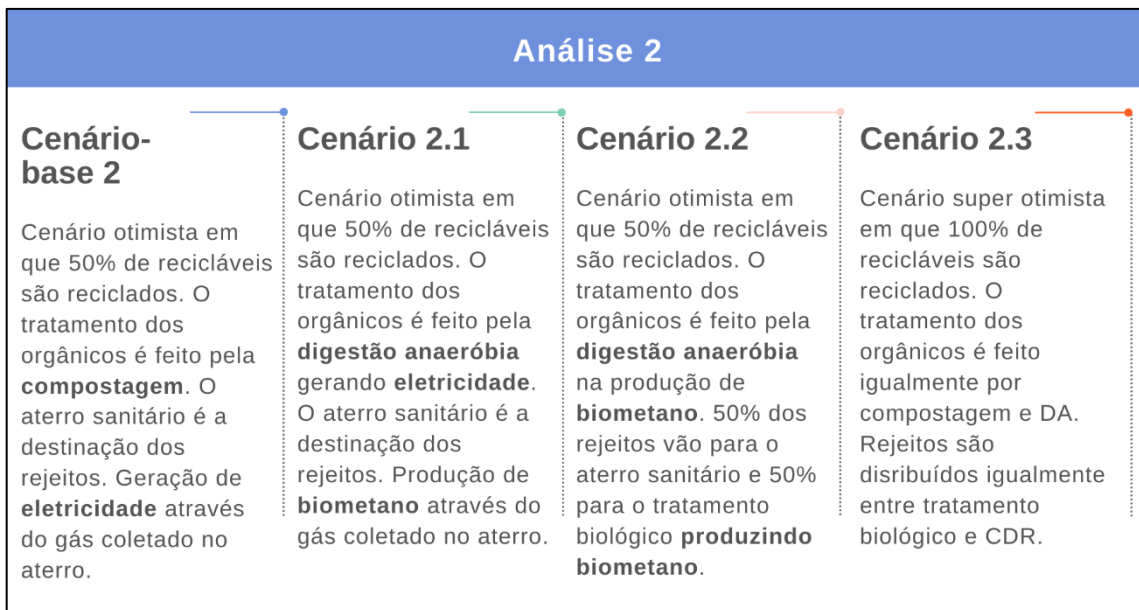


Figura 12 – Resumo da Análise 2

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS

A seguir faz-se uma descrição do fluxo geral de tratamento de cada cenário das análises.

A Figura 13 mostra o fluxograma dos cenários da Análise 1.

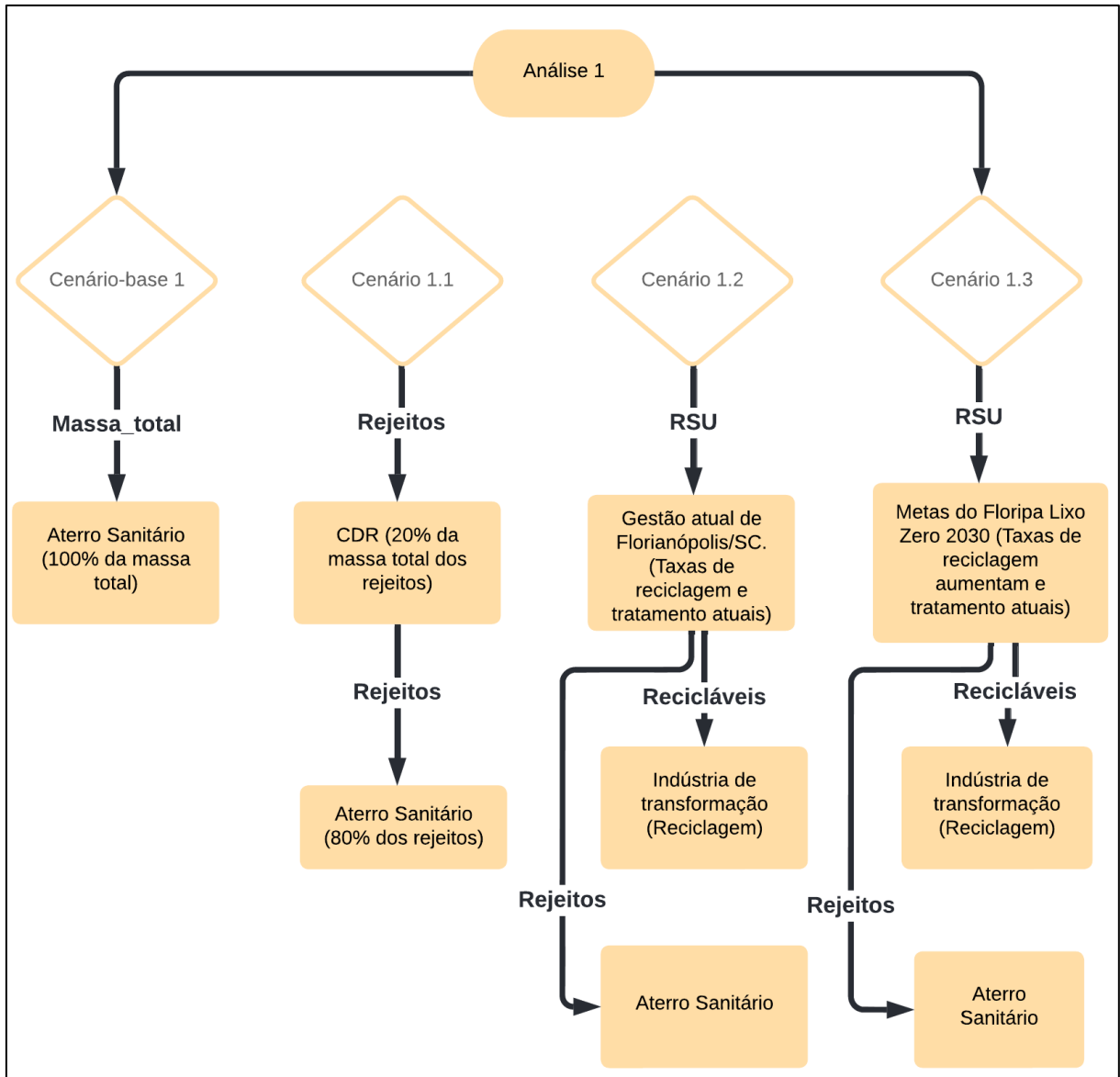


Figura 13 – Fluxograma da Análise 1
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.5.1 Análise 1: Cenário-base 1

Toda a massa de resíduos gerada pelo município de Florianópolis no ano de 2019, segundo a base de dados do SINIR, é coletada e disposta em aterro sanitário. Não ocorre a queima por *flare* (teste de emissão do aterro). Esse cenário reflete a emissão total de cada fração de resíduo levantados na gravimetria do Plano Municipal de Coleta Seletiva (PMCS) do município. A mesma massa de resíduos e gravimetria é analisada em todas as análises realizadas.

4.5.2 Análise 1: Cenário 1.1

O fluxo dos resíduos nesse cenário parte da coleta e segue parte para a disposição em aterro sanitário (80%) e a parte restante (20%) para a produção de Combustível Derivado de Resíduo (CDR). A opção de tratamento disponibilizado na calculadora é a produção de CDR a partir de resíduos secos como insumo para coprocessamento na indústria cimenteira e todo o resto destinado ao aterro sanitário. Não há reciclagem no fluxo desse cenário.

4.5.3 Análise 1: Cenário 1.2

Esse é o cenário que simula a emissão de GEE conforme os tipos de tratamento disponíveis na atual gestão do município, com as taxas de reciclagem retiradas do PMCS. Os resíduos orgânicos são destinados à compostagem, rejeitos para o aterro sanitário e queima do gás coletado por queimador *flare*. A eficiência de coleta do gás, que se refere à eficiência líquida média da proporção de gás coletado do aterro em relação ao total de gás gerado, é de 10% para todos os cenários da Análise 1 e Análise 2.

4.5.4 Análise 1: Cenário 1.3

O fluxo do Cenário 1.3 simula o alcance das metas estipuladas pelo programa Floripa Lixo Zero 2030. Possui o mesmo tipo de tratamento e destinação do Cenário 1.2, distinguindo-se pelo aumento da fração de resíduos desviados do aterro sanitário e sendo reciclados. A meta estipulada é aumentar em 9 vezes a coleta de resíduos orgânicos e 4,5 vezes a coleta de recicláveis secos. Esse aumento nas frações de recicláveis foi simulado na ferramenta.

O Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) – Decreto nº 17.910/2017 estabelece metas progressivas até 2030 que reduzem a emissão ao aterro sanitário, além disso o Programa Florianópolis Capital Lixo Zero 2030 (Decreto nº 18.646/2018) prevê diretrizes de acordo com a PNRS:

...incentivo a não geração e a redução dos RSU; atendimento às metas de reduções estabelecidas pelo PMGIRS; promoção da valorização dos RSU; desenvolvimento e aplicação de programas educacionais; criação de governança para proposição e controles a gestão e políticas públicas; promoção da inclusão social; articulação e integração com as demais políticas públicas municipais; incentivo à busca de soluções integradas com os Municípios da Região Metropolitana (LUIZ, 2022).

4.5.5 Fluxograma da Análise 2

A Figura 14 mostra o fluxograma resumido da Análise 2.

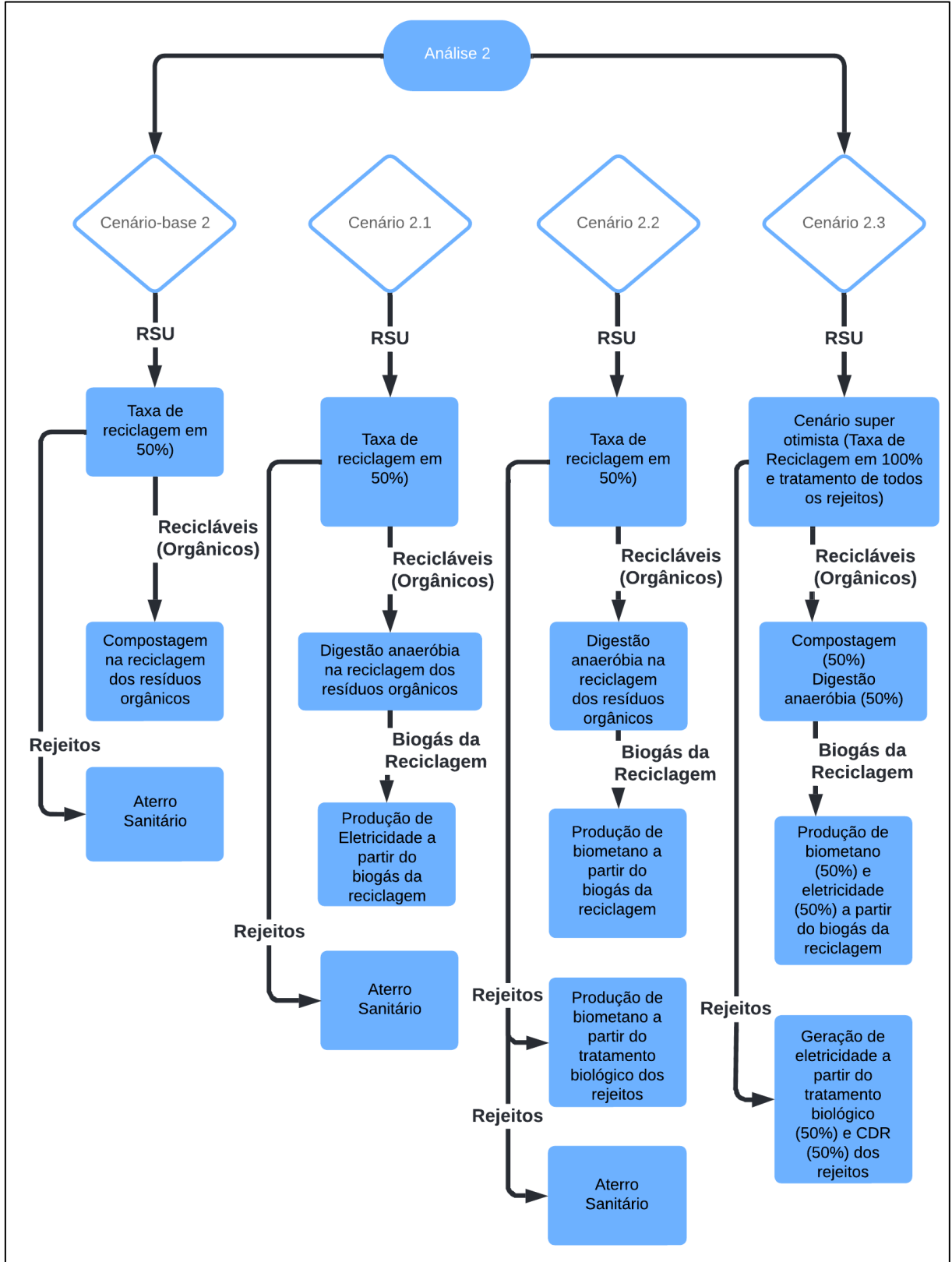


Figura 14 – Fluxograma da Análise 2.

4.5.6 Análise 2: Cenário-base 2

Esse cenário serve de base para a comparação entre a eficiência da compostagem e da digestão anaeróbia na redução das emissões de GEE.

Para essa comparação, o fluxo do Cenário-base 2 recicla toda a fração orgânica através da compostagem.

Todos os cenários da Análise 2, com exceção do Cenário 2.3, tiveram a porcentagem de reciclagem de todas as frações de materiais recicláveis em 50%, simulando um cenário otimista, tendo em vista que a taxa média nacional de reciclagem não alcança 10%.

4.5.7 Análise 2: Cenário 2.1

O fluxo dos resíduos no Cenário 2.1 segue com a reciclagem de 50% de todas as frações dos materiais recicláveis. A reciclagem dos orgânicos é realizada pela digestão anaeróbia na substituição de fertilizantes utilizados na agricultura, áreas verdes ou em florestamento. O biogás gerado na digestão anaeróbia é utilizado para a produção de eletricidade.

Os rejeitos são destinados ao aterro sanitário (100%) e o gás coletado no aterro é utilizado na produção de biometano. A eficiência na coleta do gás de aterro continua sendo 10%.

4.5.8 Análise 2: Cenário 2.2

O fluxo do Cenário 2.2 também recicla 50% de todas as frações dos materiais recicláveis. A fração orgânica é reciclada através da digestão anaeróbia e todo o gás é utilizado na produção de biometano.

Os rejeitos são destinados em 50% para o aterro sanitário e 50% recebe tratamento biológico, onde produz-se biometano através do gás coletado e o resíduo gerado utilizado na cobertura do aterro.

4.5.9 Análise 2: Cenário 2.3

O fluxo desse cenário é ainda mais otimista que os cenários anteriores. Considera-se um aproveitamento de 100% na taxa de reciclagem de todo o material apto ao processo. A reciclagem dos orgânicos é feita igualmente entre compostagem e digestão anaeróbia (50% para cada processo).

Não há destinação ao aterro sanitário. Metade dos resíduos não reciclados é utilizado no tratamento biológico da matéria orgânica e a outra metade na produção de CDR a partir de resíduos secos como insumo para coprocessamento na indústria cimenteira com o restante recebendo tratamento biológico. Produz-se eletricidade através do biogás no tratamento biológico.

4.6 FLUXO DOS CENÁRIOS

A Figura 15 e a Figura 16 ilustram os fluxos dos resíduos em cada cenário.

Fluxo: Análise I					
	RECICLAGEM		REJEITOS		Uso do gás no aterro
	Resíduos Secos	Orgânicos	Tratamento	Disposição	
Cenário-base I	×	×	×	Aterro sanitário	×
Cenário 1.1	×	×	CDR (20%)	Aterro sanitário (80%)	Eletricidade
Cenário 1.2	Gravimetria PMCS	-Gravimetria PMCS -Compostagem	×	Aterro sanitário	Queimador Flare
Cenário 1.3	Metas Floripa Lixo Zero 2030	-Metas Floripa Lixo Zero 2030 -Compostagem	×	Aterro sanitário	Queimador Flare

Figura 15 – Fluxo dos cenários na Análise I
Fonte: Elaborada pelo autor.

Fluxo: Análise 2					
	RECICLAGEM		REJEITOS		Uso do gás no aterro
	Resíduos Secos	Orgânicos	Tratamento	Disposição	
Cenário-base 2	50% de todos os materiais recicláveis	-50% dos orgânicos -Compostagem	✘	Aterro sanitário	Eletricidade
Cenário 2.1	50% de todos os materiais recicláveis	-50% dos orgânicos -Digestão anaeróbia -Eletricidade	✘	Aterro sanitário	Biometano
Cenário 2.2	50% de todos os materiais recicláveis	-50% dos orgânicos -Digestão anaeróbia -Biometano	-Tratamento biológico (50%) - Biometano	Aterro sanitário (50%)	Eletricidade
Cenário 2.3	100% de todos os materiais recicláveis	-100% dos orgânicos -Compostagem (50%) -Digestão anaeróbia (50%) -Biometano (50%) -Eletricidade (50%)	-Tratamento biológico (50%) -CDR (50%) -Eletricidade	✘	Eletricidade

Figura 16 – Fluxo dos cenários na Análise 2

Fonte: Elaborada pelo autor.

5 RESULTADOS

A Calculadora permite até quatro sistemas diferentes de gestão de resíduos para comparação, podendo ser copiada e salva com um nome diferente, o que amplia os horizontes de comparações. Por isso, esse trabalho contou com duas análises: Análise 1 e Análise 2, o que permite a comparação entre 8 cenários distintos. A seguir são detalhados os dados inseridos e resultados obtidos através da Calculadora de Emissões de GEE para resíduos.

Os resultados foram comparados com a dissertação de mestrado intitulado “*Análise de Emissões de Gases de Efeito Estufa dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Florianópolis a Partir da Proposição de Cenários de Valorização de Resíduos*”, elaborado por Bruno Vieira Luiz em 2022. Dois cenários puderam ser comparados, o Cenário-base 1, que simula emissão da massa total de GEE destinada ao aterro sanitário e o Cenário 1.2 que simula a gestão atual do município de Florianópolis. Para a emissão de GEE de toda a massa disposta no aterro sanitário, O estudo de Luiz (2022) encontrou uma emissão de 62.045 T_{MC}O₂eq, utilizando o software Waste Reduction Model (WARM), enquanto pela Calculadora de Emissões aqui utilizada encontrou um valor de 370.825 toneladas de CO₂ eq/ano, valor 6 vezes maior que o encontrado pelo WARM. No cenário 1.2, que simula a emissão de GEE na gestão atual, o estudo

de Luiz (2022) resultou em uma emissão de GEE de 45.792 T_{MC}CO₂eq, enquanto o presente trabalho encontrou uma emissão de 325.556 toneladas de CO₂ eq/ano, valor 7 vezes maior que o resultado do WARM.

5.1 DADOS INSERIDOS NA FERRAMENTA

De acordo com o Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos – SINIR, a massa total de RSU coletados em Florianópolis foi de 212.303 toneladas no ano de 2019, último ano disponibilizado. A gravimetria obtida no PMCS em 2014 foi utilizada para compor a gravimetria da massa total de RSU em 2019, último ano com as informações disponibilizadas na base de dados do SINIR. A Figura 17 traz a gravimetria inserida na ferramenta que serão utilizadas em todos os cálculos. A coluna Padrão do Brasil é baseada em dados a nível nacional e aparece como sugestão na ausência de referências locais.

Componentes	Padrão do Brasil		em % de resíduos úmidos
Resíduos de alimentos	48,4%		23,66%
Resíduos de jardins e parques	3,0%		11,19%
Papel, papelão	13,1%		17,47%
Plásticos	13,5%		18,48%
Vídeos	2,4%		4,04%
Metais ferrosos	2,3%		1,95%
Alumínio	0,6%		0,65%
Têxteis	2,6%		4,17%
Borracha, couro	0,7%		0,47%
Fraldas (descartáveis)	4%		15,85%
Madeira	4,7%		0,37%
Resíduos minerais	0,0%		0,00%
Outros	4,7%		1,70%
Total (deve ser 100%)	100,0%	0,0%	100,00%
Quantidade total de resíduos (t/ano)			212.303

Figura 17 – Dados inseridos na aba Início.
Fonte: BRASIL (2021)

5.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES

5.2.1 Análise 1

Os objetivos dessa primeira análise são:

- Comparar as emissões de GEE do Cenário 1.1, Cenário 1.2 e Cenário 1.3 em relação ao Cenário-base 1, que é o cenário que traz a emissão total do aterro sanitário sem nenhum tipo de tratamento ou queima do gás através do queimador *flare*.
- Comparar a eficiência do aumento na porcentagem da reciclagem em relação ao cenário encontrado no Plano Municipal de Coleta Seletiva – PMCS, seguindo o programa Floripa Lixo Zero 2030, onde a meta é aumentar em 4,5 vezes a coleta de todas as frações de resíduos secos atuais progressivamente até 2030 e 9 vezes a coleta de compostos orgânicos progressivamente até 2030..

A Tabela 9 resume os principais *inputs* nas abas reciclagem e destinação da ferramenta.

Tabela 9 – Resumo da Análise 1

			Cenário-base 1	Cenário 1.1	Cenário 1.2	Cenário 1.3
Análise 1	Aba reciclagem	Reciclagem	0%	0%	(2014)	(2030)
		Compostagem	0%	0%	100%	100%
	Aba Destinação	CDR seco + cimenteira + rejeito para aterro	0%	20%	0%	0%
		Aterro sanitário com possibilidade de coleta de gás	100% (Sem queima do gás)	80%	100% (Queima de 100% do gás pelo queimador Flare)	100% (Queima de 100% do gás pelo queimador Flare)

Legenda: (2014) - Gravimetria do PMCS; (2030) - Gravimetria para o Floripa Lixo Zero 2030.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A primeira análise avalia o cenário atual na gestão dos RSU em Florianópolis e uma inovação no tratamento dos resíduos (produção de CDR no Cenário 1.1). O Cenário-base 1 é o teste de emissão de GEE da massa total gerada no município. O Cenário 1.1 simula um cenário em que não ocorre nenhum tipo de reciclagem para medir o potencial de redução das emissões de CO₂ com a utilização do CDR para o uso da energia térmica nos fornos de cimenteiras e o rejeito para a cobertura do aterro. O Cenário 1.2 reflete o cenário atual e o Cenário 1.3 simula as metas a serem alcançadas com o programa Floripa Lixo Zero 2030.

A Figura 18, Figura 19, Figura 20 e Figura 21 demonstram os valores detalhados inseridos na Calculadora na Análise 1.

Materiais secos			Cenário-Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Indique aqui o percentual de material seco reciclado			Cenário-Base 1	Cenário 1.1	Cenário 1.2	Cenário 1.3
x% de	Tipo de material para reciclagem	em %	em %	em %	em %	em %
	Papel, papelão	0,00%	0,00%	2,42%	10,89%	
	Plásticos	0,00%	0,00%	1,46%	6,57%	
	Vidros	0,00%	0,00%	0,98%	4,41%	
	Metais ferrosos	0,00%	0,00%	2,14%	9,63%	
	Alumínio	0,00%	0,00%	1,35%	6,08%	
	Têxteis	0,00%	0,00%	0,17%	0,77%	
				2014	2030 (4,5x)	
Resíduos orgânicos						
Indique aqui o percentual de alimentos e resíduos de jardins e parques reciclados que são utilizados na agricultura, em áreas verdes ou no florestamento e que substituem fertilizante mineral/químico.						
x% de	Tipo de resíduo orgânico para reciclagem	em %	em %	em %	em %	
	Resíduos de alimentos	0,00%	0,00%	0,06%	0,54%	
	Resíduos de jardins e parques	0,00%	0,00%	0,01%	0,09%	
			2014	2014	2030 (9x)	
Indique a parcela de resíduos orgânicos que são compostados e digeridos						
x% de	Resíduos orgânicos para reciclagem	em %	em %	em %	em %	
	Compostagem	0%	0%	100%	100%	
	Digestão anaeróbia (DA)	0%	0%			
	Total (deve ser 100%)	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	
			em %	em %	em %	
	Biogás da digestão anaeróbia para produção de eletricidade	0%	0%	0%	0%	
	Biogás da digestão anaeróbia para produção de biometano	0%	0%	0%	0%	

Figura 18 – Dados inseridos na aba Reciclagem para a Análise 1.

Fonte: BRASIL (2021)

		Cenário-Base 1	Cenário 1.1	Cenário 1.2	Cenário 1.3
Tipo de tratamento e disposição final de resíduos		em %	em %	em %	em %
Evitar!	Resíduos dispersos não queimados				
	Queima aberta de resíduos dispersos				
Disposição no solo	Lixão				
	Aterro controlado sem coleta de gás				
	Aterro sanitário com possibilidade de coleta de gás	100,0%	80,0%	100,0%	100,0%
Outras opções de recuperação e disposição final	<i>Se o tratamento biológico for digestão anaeróbia em vez de compostagem,</i>				
	Tratamento biológico + cobertura de aterro	<i>preencha nas linhas 46/47</i>			
	CDR seco + cimenteira + rejeito para aterro		20,0%		
	CDR seco + cimenteira + trat. biol. + cobertura de aterro	<i>preencha nas linhas 51/52</i>			
	CDR seco + biosecagem CDR org. + cimenteira				
	Incineração de RSU				
Total (deve ser 100%)		100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Figura 19 – Dados inseridos na aba Destinação para a Análise 1

Fonte: BRASIL (2021)

Informação sobre o aterro sanitário — Coleta e uso do biogás						
Aqui você pode especificar as tecnologias de disposição de aterros.						
Para os fins do ProteGEEr, opções específicas de coleta e tratamento de gases são definidas para o Brasil e podem ser encontradas no manual.						
No caso de aterro sanitário, insira aqui a parte geral do gás de aterro coletado como valor médio durante a vida útil do aterro sanitário (para mais explicações, vide comentário ou manual).						
	Min	Máx				
Eficiência na coleta de gás	10%	50%	10%	10%	10%	10%
Defina aqui o tratamento do gás de aterro coletado geral (para mais explicações sobre as opções de tratamento, consulte o manual).						
Tratamento e tipo de uso do gás de aterro coletado						
Sem queima (teste de emissão do aterro sanitário)		100%				em %
Queimador Flare				100%	100%	em %
Geração da eletricidade			100%			em %
Produção de biometano						em %
Total (deve ser 100%)		100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	

Figura 20 - Dados inseridos na aba Destinação para a Análise 1
Fonte: BRASIL (2021)

Outras opções de tratamento						
Se a digestão anaeróbia for aplicada em vez de tratamento biológico aeróbico simples, insira um valor para o uso do biogás gerado (o total deve ser de 100%)						
Tratamento biológico + cobertura de aterro						
Produção de eletricidade a partir do biogás						em %
Produção de biometano a partir do biogás						em %
Total (deve ser 100% ou 0%)		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
CDR seco + cimenteira + trat. biol. + cobertura de aterro						
Produção de eletricidade a partir do biogás						em %
Produção de biometano a partir do biogás						em %
Total (deve ser 100% ou 0%)		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	

Figura 21 - Dados inseridos na aba Destinação para a Análise 1
Fonte: BRASIL (2021)

5.2.1.1 Resultados Análise 1

A Figura 22 traz as emissões emitidas e evitadas para todos os cenários. O cenário-base 1 delimita as emissões, já que não há nenhum tipo de tratamento e nem a queima do gás gerado no aterro, emitindo 370.825 toneladas de CO₂ eq/ano.

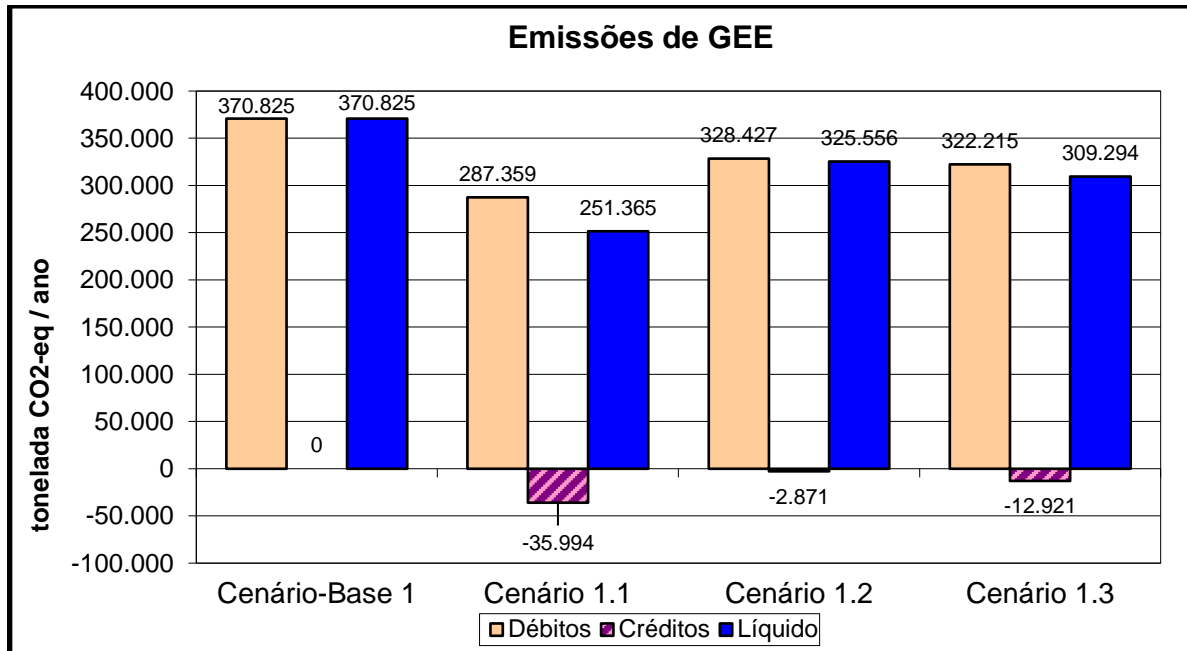


Figura 22 – Resumo das emissões de GEE na Análise 1.
Fonte: BRASIL (2021)

Percebe-se através desse primeiro resultado que o crédito, ou seja, a emissão evitada através do uso do CDR no Cenário 1.1 como combustível na indústria cimenteira gerou o maior retorno nas emissões evitadas entre todos os cenários. A porcentagem de resíduos sólidos destinados à fabricação do CDR no Cenário 1.1 foi de 20%, como mostra a Figura 19. O Cenário 1.1 também levou em conta a geração de eletricidade através da coleta do gás gerado pelo aterro sanitário, o que não ocorreu no Cenário 1.2 e 1.3, onde apenas simulou-se a queima do gás por *flare*.

O Cenário 1.3, que representa o resultado das metas estipuladas pelo programa Floripa Lixo Zero 2030, obteve um ganho de cerca de 10.000 toneladas de CO₂ eq/ano em relação ao patamar de reciclagem atual.

A Figura 23 detalha as emissões de cada cenário por etapa (reciclagem, destinação e o total).

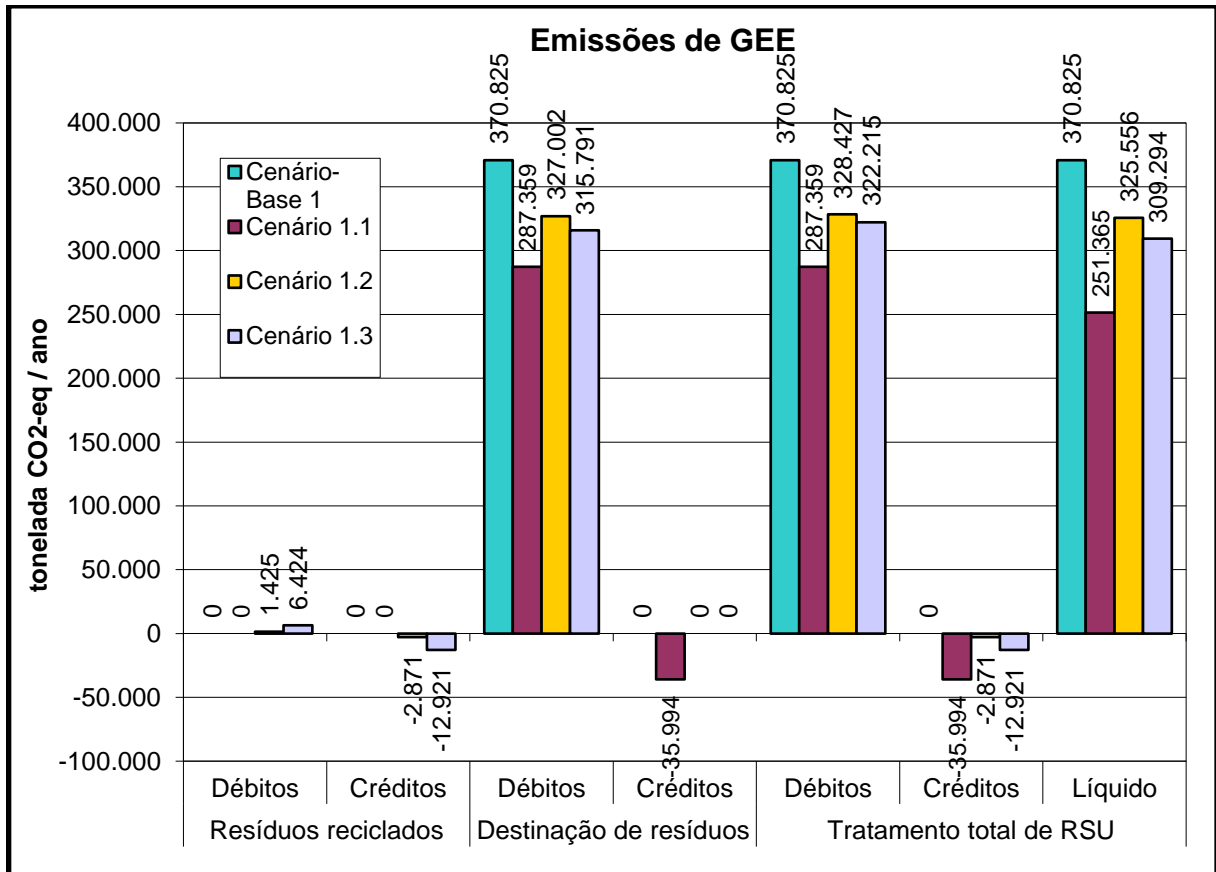


Figura 23 – Emissões emitidas e evitadas por etapa da Análise 1

Percebe-se que as emissões evitadas pela reciclagem nos níveis atuais ainda são tímidas, havendo a necessidade de se implementarem ações que elevem a massa reciclada e retirem grandes massas destinadas ao aterro e além disso, uma combinação com outros tipos de tratamento.

5.2.1.1.1 Detalhamento do Cenário-base 1

Para o cenário-base 1, teste de emissão da massa gerada pelo município, o resultado é de 370.825,00 toneladas de CO₂ eq/ano. Como mencionado, não há nenhum tipo de tratamento nesse cenário e tampouco a queima do gás através do queimador *flare* após a coleta do gás.

5.2.1.1.2 Detalhamento do Cenário 1.1

Como a simulação do Cenário 1.1 não considera percentuais de reciclagem, o detalhamento abrange somente os resultados da destinação, no caso o tratamento através do CDR. A Tabela 10 mostra as emissões por tipo de destinação.

Tabela 10 – Emissões do Cenário 1.1 quanto à destinação de resíduos (toneladas de CO₂-eq/ano)

Tratamento e disposição final de resíduos	Emissões	Emissões evitadas	Resultado líquido
Aterro sanitário	264.121	-454	263.667
CDR seco + rejeito aterro	23.238	-35.540	-12.302

As emissões evitadas do aterro sanitário é de -454,00 toneladas de CO₂ eq/ano e deve-se à utilização do gás do aterro para a geração de energia elétrica. Quanto ao CDR, o resultado líquido no manejo é de -12.302,00 toneladas de CO₂ eq/ano.

Em comparação com o cenário-base 1, teste de emissão do aterro, a redução líquida de emissões foi de 119.460,00 toneladas de CO₂ eq/ano, ou seja, uma redução de 32% em relação às emissões líquidas do aterro sanitário sem nenhum tratamento.

A Figura 24 resume as emissões na destinação do Cenário 1.1. Os créditos do aterro não aparecem por serem relativamente menores que as outras emissões, mas foi detalhada na Tabela 10.

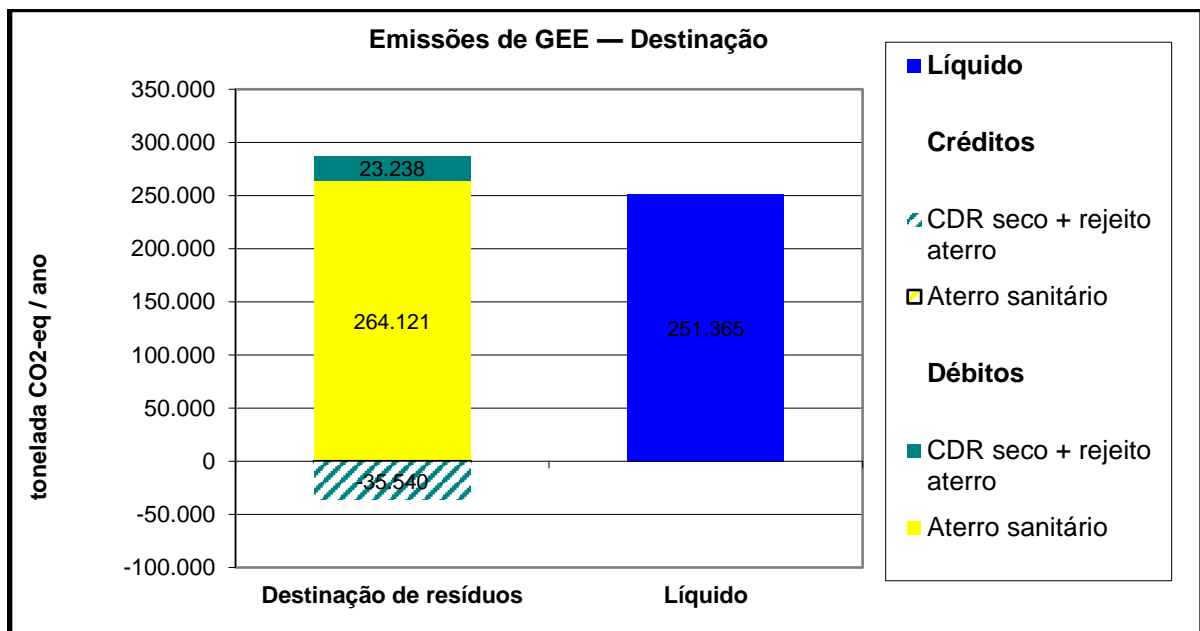


Figura 24 - Emissões do cenário 1.1 quanto à destinação de resíduos

5.2.1.1.3 Detalhamento do Cenário 1.2

O cenário 1.2 é a simulação da gestão atual no município de Florianópolis, para as emissões da massa de resíduos no ano de 2019, como já mencionado. A Tabela 11 detalha as

emissões quanto ao débito, utilizado no processo de reciclagem e os créditos, que representam as emissões evitadas. O resultado líquido é a soma dos débitos e créditos.

Tabela 11 - Emissões do Cenário 1.2 quanto à reciclagem dos resíduos

Resíduos reciclados	Emissões*	Emissões evitadas*	Resultados líquidos*
Resíduos de alimentos	3	-1	2
Resíduos de jardins e parques	0	0	0
Papel, papelão	1.127	-1.389	-262
Plásticos	235	-1.094	-859
Vidros	41	-51	-10
Metais ferrosos	6	-152	-146
Alumínio	13	-184	-171

*: Resultados em toneladas de CO₂-eq/ano

Percebe-se que o papel e papelão e os plásticos são os que possuem crédito mais elevados, porém o débito do papel também é muito alto. Os plásticos são os que tem o melhor resultado líquido (-1154 toneladas de CO₂ eq/ano), o que faz dessa porção ser praticamente 80% do resultado líquido total.

A Figura 25 ilustra os resultados para esse cenário.

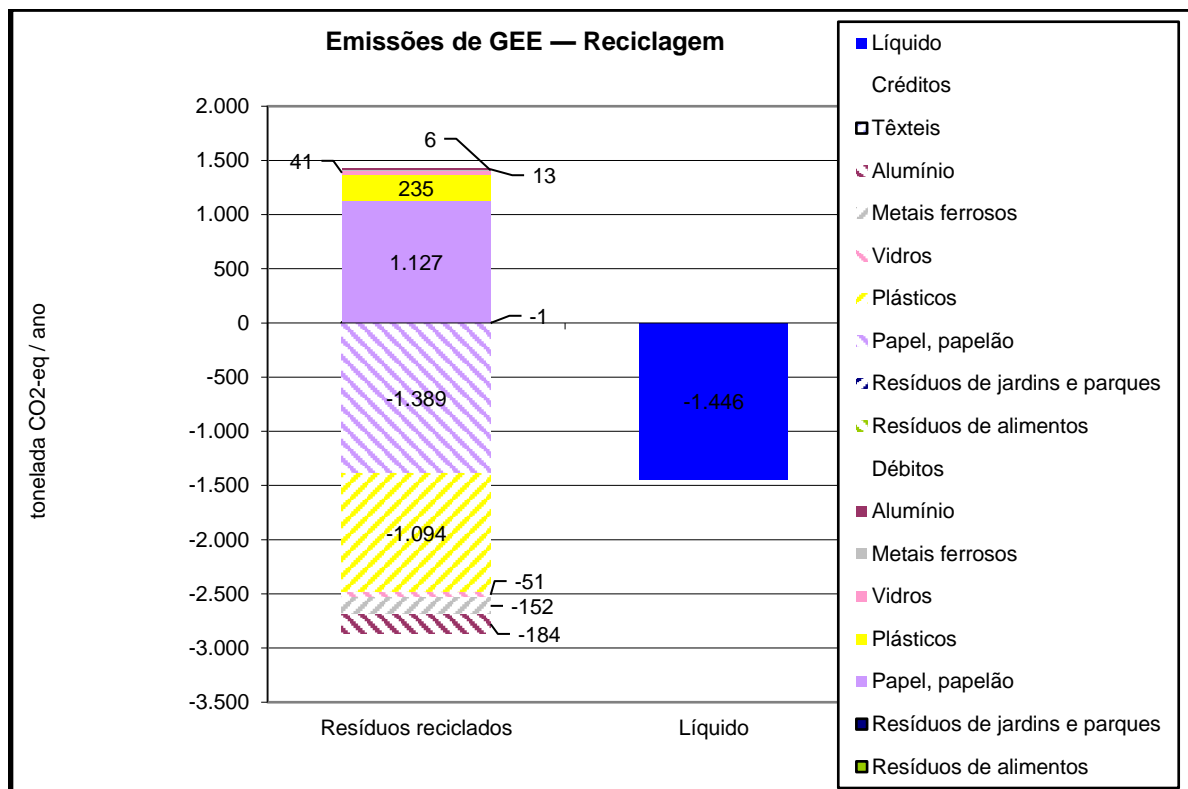


Figura 25 - Emissões do cenário 1.2 quanto à reciclagem

A Figura 26 mostra a emissão total da massa não desviada do aterro sanitário.

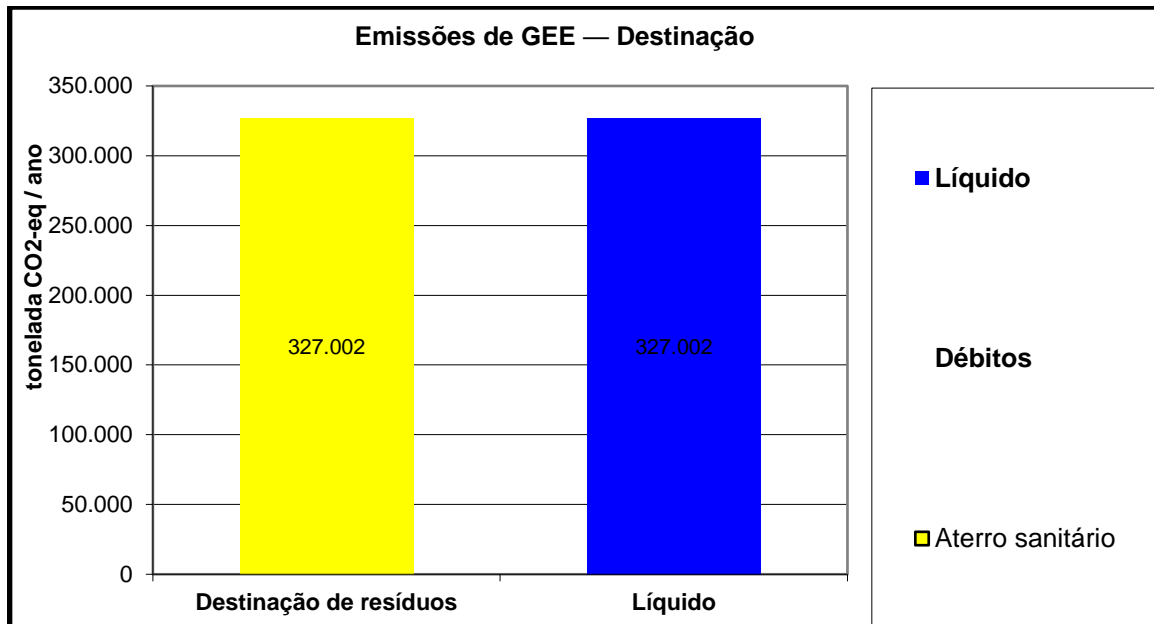


Figura 26 – Emissões do cenário 1.2 quanto à destinação.

Em comparação com o cenário-base 1, ocorreu uma diminuição da emissão pelo aterro sanitário em 43.823,00 toneladas de CO₂ eq/ano, aproximadamente 12% em relação à emissão do cenário base. A destinação nessa simulação contou apenas com o aterro sanitário e queima do gás por *flare*.

5.2.1.1.4 Detalhamento do cenário 1.3

O cenário 1.3, assim como o cenário 1.2, foca também no potencial da reciclagem como redutor das emissões de CO₂. Seu principal propósito é levar em conta as metas do Programa Floripa Lixo Zero 2030, aumentando em 9 vezes a coleta de resíduos orgânicos e 4,5 vezes a coleta de recicláveis secos em relação à situação atual, representado pelo Cenário 1.3.

Tabela 12 - Emissões do Cenário 1.3 quanto à reciclagem dos resíduos

Resíduos reciclados	Emissões*	Emissões evitadas*	Resultados líquidos*
Resíduos de alimentos	26	-6	19
Resíduos de jardins e parques	2	-1	2
Papel, papelão	5.073	-6.252	-1.179
Plásticos	1.057	-4.923	-3.866
Vidros	183	-228	-46
Metais ferrosos	26	-683	-657
Alumínio	58	-828	-770

*: Resultados em toneladas de CO₂-eq/ano

O débito no aumento da taxa de reciclagem dos resíduos de alimentos passou de 3 para 26 toneladas de CO₂ eq/ano com o aumento da coleta em 9 vezes em relação ao cenário de reciclagem do cenário 1.2. O plástico continua tendo o maior ganho líquido na redução das emissões.

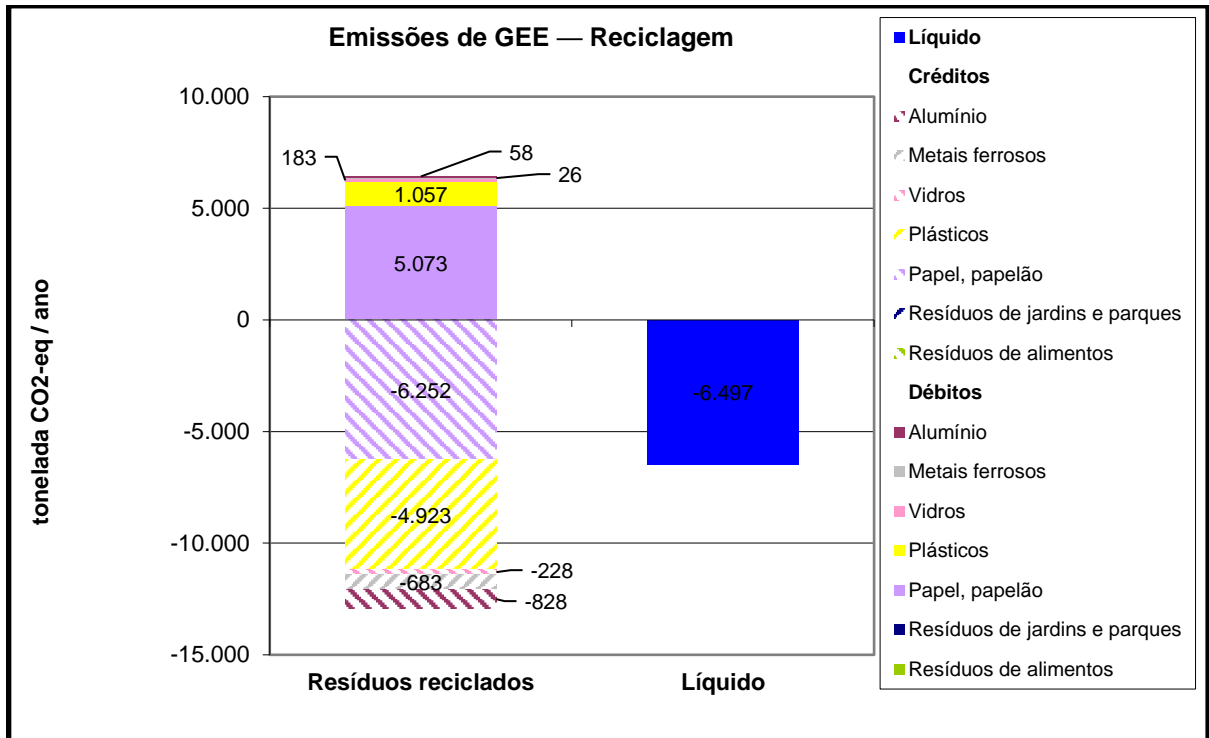


Figura 27 - Emissões do cenário 1.3 quanto à reciclagem.

O crédito de emissões líquida para esse cenário foi de 6.497 toneladas de CO₂ eq/ano. Um valor 4,5 vezes mais favorável que o cenário 2.1.

Referente às emissões do aterro sanitário, a Figura 28 mostra que a emissão pelo aterro sanitário foi de 315.791 toneladas de CO₂ eq/ano, uma redução de 55.034 toneladas de CO₂ eq/ano.

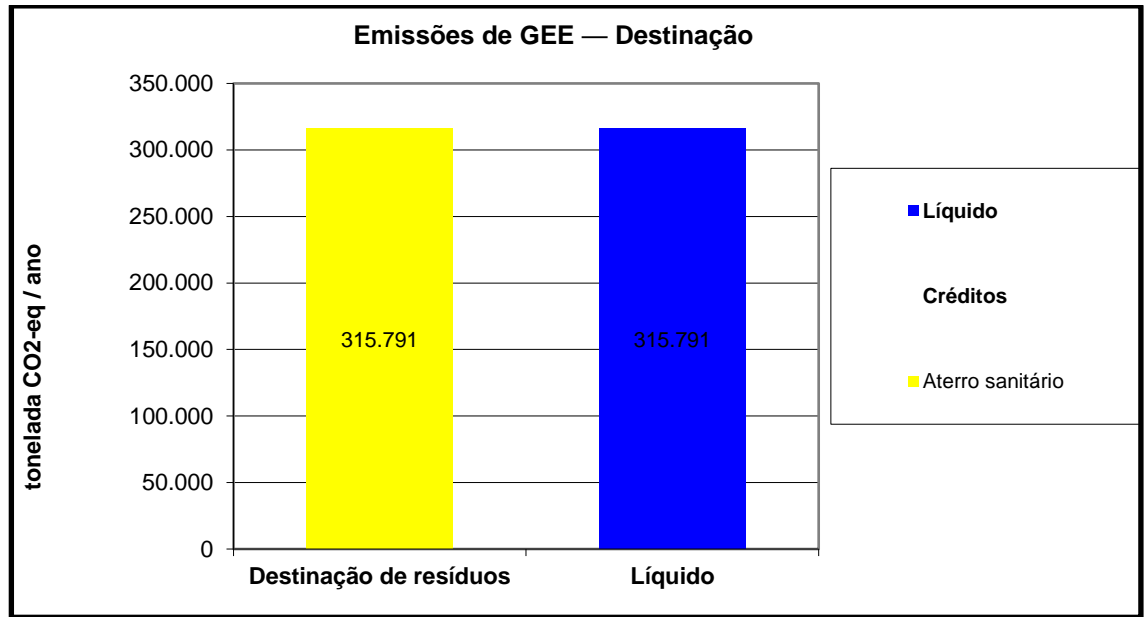


Figura 28 - Emissões do Cenário 1.3 quanto à destinação.

5.2.2 Análise 2

Os objetivos da segunda análise são:

- Potencializar a redução das emissões com a adoção de mais opções de tratamento na gestão dos resíduos disponibilizadas pela ferramenta baseado em tendências nacionais e também nas metas do Plano Municipal de Coleta Seletiva – PMCS, que apresenta um projeto de uma planta de biodigestão.
- A massa de resíduos e a gravimetria se mantêm as mesmas para comparação com a primeira análise.

Na segunda análise, os cenários tornam-se mais otimistas e hipotéticos para comparação com o cenário atual. O cenário-base continua sendo a destinação total ao aterro sanitário sem nenhum tipo de tratamento. O cenário 2.1 são as taxas de reciclagem e tratamento atuais e o cenário 2.2 e 2.3 progressões na taxa de reciclagem e também a comparação entre emissões do tratamento via compostagem e digestão anaeróbia e uso do biogás para produção de eletricidade ou biometano.

Segundo o documento **BIOGÁS NO BRASIL – Potencial de descarbonização a curto prazo**, produto do Programa de Energia para o Brasil (BEP), com a participação do Instituto 17, o setor de resíduos sólidos é o que apresenta maior potencial de redução de emissões de GEE através da geração de energia elétrica ou da produção do biometano através do aproveitamento do biogás, justificando a análise nesse trabalho.

Pela análise de Liikanen et al., (2018), a digestão anaeróbia é uma melhor opção de tratamento que a compostagem na redução das emissões de GEE. Entre os cenários da segunda análise serão implementadas simulações que confirmem esses resultados, assim como o potencial de descarbonização através do aproveitamento energético do biogás. A Tabela 13 traz o resumo dos valores utilizados na Análise 2.

Tabela 13 – Resumo da Análise 2

			Cenário-base 2	Cenário 2.1	Cenário 2.2	Cenário 2.3
Análise 1	Aba reciclagem	Reciclagem	50% para todas as frações	50% para todas as frações	50% para todas as frações	100% para todas as frações
		Compostagem	100%	0%	0%	50%
		Digestão Anaeróbia	0%	100% (Todo resíduo orgânico gera eletricidade)	100% (Todo resíduo orgânico produz biometano)	50%
	Aba Destinação	CDR seco + cimenteira + rejeito para aterro	0%	0%	0%	50%
		Aterro sanitário com possibilidade de coleta de gás	100% (Todo o gás do aterro gera energia)	100% (Todo o gás do aterro produz biometano)	50% (Todo o gás do aterro gera energia)	0%
		Tratamento biológico e cobertura de aterro	0%		50% (Todo o gás do trat. Biol. produz biometano)	50%

Legenda: (2014) - Gravimetria do PMCS.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O Cenário2.3 é a idealização de um modelo de gestão onde toda a massa reciclável de resíduos é aproveitada. As figuras a seguir reproduzem os *inputs* na ferramenta.

Materiais secos			Cenário-Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Indique aqui o percentual de material seco reciclado			Cenário-Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
x% de	Tipo de material para reciclagem	em %	em %	em %	em %	em %
	Papel, papelão	50,00%	50,00%	50,00%	100,00%	100,00%
	Plásticos	50,00%	50,00%	50,00%	100,00%	100,00%
	Vidros	50,00%	50,00%	50,00%	100,00%	100,00%
	Metais ferrosos	50,00%	50,00%	50,00%	100,00%	100,00%
	Alumínio	50,00%	50,00%	50,00%	100,00%	100,00%
	Têxteis	50,00%	50,00%	50,00%	100,00%	100,00%

Resíduos orgânicos			Cenário-Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Indique aqui o percentual de alimentos e resíduos de jardins e parques reciclados que são utilizados na agricultura, em áreas verdes ou no florestamento e que substituem fertilizante mineral/químico.			Cenário-Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
x% de	Tipo de resíduo orgânico para reciclagem	em %	em %	em %	em %	em %
	Resíduos de alimentos	50,00%	50,00%	50,00%	60,00%	60,00%
	Resíduos de jardins e parques	50,00%	50,00%	50,00%	60,00%	60,00%

Indique a parcela de resíduos orgânicos que são compostados e digeridos			Cenário-Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
x% de	Resíduos orgânicos para reciclagem	em %	em %	em %	em %	em %
	Compostagem	100%				50%
	Digestão anaeróbia (DA)		100%	100%		50%
	Total (deve ser 100%)	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
		em %	em %	em %	em %	em %
	Biogás da digestão anaeróbia para produção de eletricidade		100%			50%
	Biogás da digestão anaeróbia para produção de biometano			100%		50%

Figura 29 - Dados inseridos na aba Reciclagem para a Análise 2
Fonte: BRASI, 2021.

		Cenário-Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Tipo de tratamento e disposição final de resíduos		em %	em %	em %	em %
Evitar!	Resíduos dispersos não queimados				
	Queima aberta de resíduos dispersos				
Disposição no solo	Lixão				
	Aterro controlado sem coleta de gás				
	Aterro sanitário com possibilidade de coleta de gás	100,0%	100,0%	50,0%	
Outras opções de recuperação e disposição final	<i>Tratamento biológico por digestão anaeróbia em vez de compostagem.</i>				
	Tratamento biológico + cobertura de aterro <i>ha nas linhas 4614?</i>			50,0%	50,0%
	CDR seco + cimenteira + rejeito para aterro				
	CDR seco + cimenteira + trat. biol. + cobertura de aterro <i>ha nas linhas 5152</i>				50,0%
	CDR seco + biosecagem CDR org. + cimenteira				
Incineração de RSU					
Total (deve ser 100%)		100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Figura 30 - Dados inseridos na aba Destinação para a Análise 2
Fonte: BRASI, 2021.

Informação sobre o aterro sanitário – Coleta e uso do biogás

Aqui você pode especificar as tecnologias de disposição de aterros.
 Para os fins do ProteGEEr, opções específicas de coleta e tratamento de gases são definidas para o Brasil e podem ser encontradas no manual.

No caso de aterro sanitário, insira aqui a parte geral do gás de aterro coletado como valor médio durante a vida útil do aterro sanitário (para mais explicações, vide comentário ou manual).

	Mín	Máx				
Eficiência na coleta de gás	10%	50%	10%	10%	10%	10%

Defina aqui o tratamento do gás de aterro coletado geral (para mais explicações sobre as opções de tratamento, consulte o manual).

Tratamento e tipo de uso do gás de aterro coletado					
Sem queima (teste de emissão do aterro sanitário)					em %
Queimador Flare					em %
Geração da eletricidade		100%	100%	100%	em %
Produção de biometano		100%	100%	100%	em %
Total (deve ser 100%)		100,00%	100,00%	100,00%	

Se uma camada de oxidação aprimorada de metano for aplicada, preencha a eficiência de oxidação superior à eficácia padrão de oxidação de metano do IPCC 2006 de 10% de uma cobertura normal de aterro.

Efeito da oxidação da cobertura do aterro	Padrão IPCC 10%				
Eficiência da oxidação de metano pela camada de oxidação	10%	10%	10%	10%	em %

Outras opções de tratamento

Se a digestão anaeróbica for aplicada em vez de tratamento biológico aeróbico simples, insira um valor para o uso do biogás gerado (o total deve ser de 100%)

Tratamento biológico + cobertura de aterro					
Produção de eletricidade a partir do biogás				100%	em %
Produção de biometano a partir do biogás			100%		em %
Total (deve ser 100% ou 0%)		0,00%	0,00%	100,00%	100,00%

CDR seco + cimenteira + trat. biol. + cobertura de aterro					
Produção de eletricidade a partir do biogás				100%	em %
Produção de biometano a partir do biogás					em %
Total (deve ser 100% ou 0%)		0,00%	0,00%	0,00%	100,00%

Figura 31 - Dados inseridos na aba Destinação para a Análise 2
 Fonte: BRASI, 2021.

5.2.2.1 Resultados Análise 2

A Figura 32 traz as emissões diretas, evitadas e emissões líquidas para todos os cenários da Análise 2.

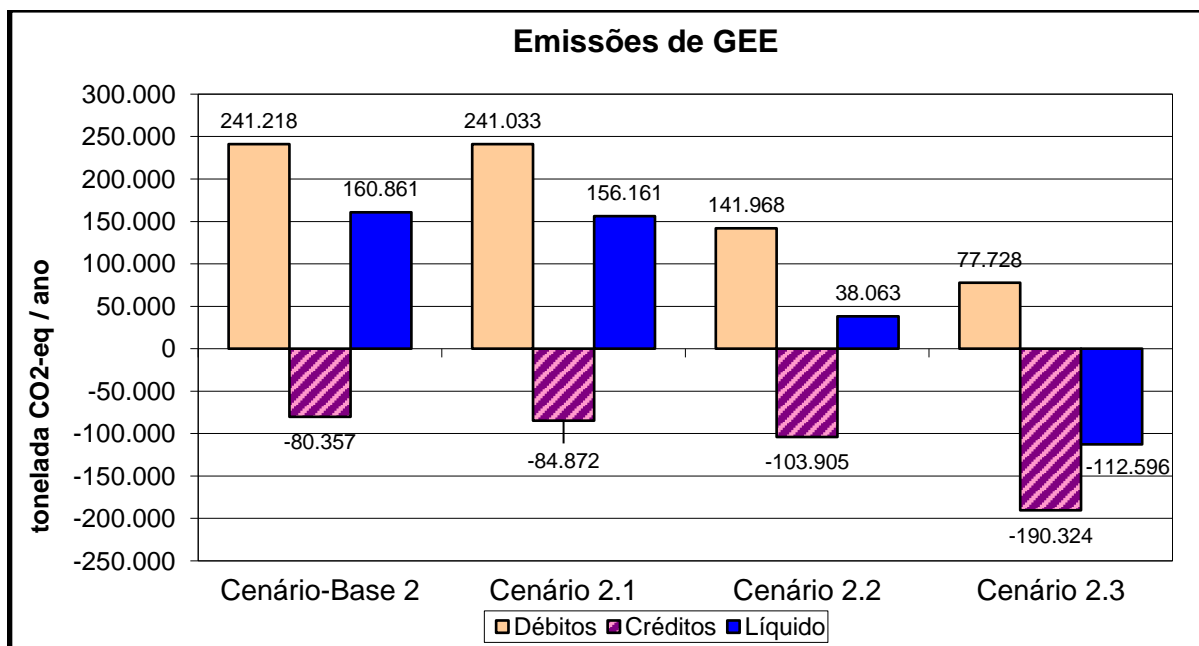


Figura 32 - Resumo das emissões de GEE na Análise 2
Fonte: BRASI, 2021.

Das duas análises, apenas o cenário 2.3 da Análise 2, que hipoteticamente recupera 100% de todas as frações recicláveis e trata todos os rejeitos, possui crédito nas emissões. O Cenário 2.2 alcança uma menor emissão desviando 50% dos rejeitos do aterro sanitário para o aproveitamento do potencial energético do biogás para a produção de eletricidade. O cenário-base 2 conta apenas com a compostagem para comparação com o cenário 2.1 que conta com a digestão anaeróbia. Percebe-se que a diminuição da emissão na digestão anaeróbia do cenário 1 é de 804 toneladas de CO₂. A seguir são detalhados os cenários simulados.

5.2.2.1.1 Detalhamento do cenário-base 2

O cenário-base serve de base para comparação quanto às emissões da compostagem em relação à digestão anaeróbia do cenário 2.1. Sendo o cenário-base responsável por compostar 50% dos resíduos orgânicos da massa total, conforme a mostra a Figura 29.

Tabela 14 - Emissões quanto à reciclagem e descarte de resíduos no cenário-base.

	Emissões	Emissões evitadas	Resultados líquidos
Resíduos reciclados			
Resíduos de alimentos	2.386	-600	1.786
Resíduos de jardins e parques	1.128	-284	845
Papel, papelão	23.292	-28.707	-5.415
Plásticos	8.043	-37.464	-29.421
Vidros	2.072	-2.590	-518
Metais ferrosos	132	-3.544	-3.411
Alumínio	481	-6.817	-6.336
Descarte de resíduos			
Aterro sanitário	203.683	-350	203.333
Total	241.218	-80.357	160.861

Fonte: BRASI, 2021.

A Figura 33 ilustra as emissões de CO₂ equivalente para o cenário-base 2.

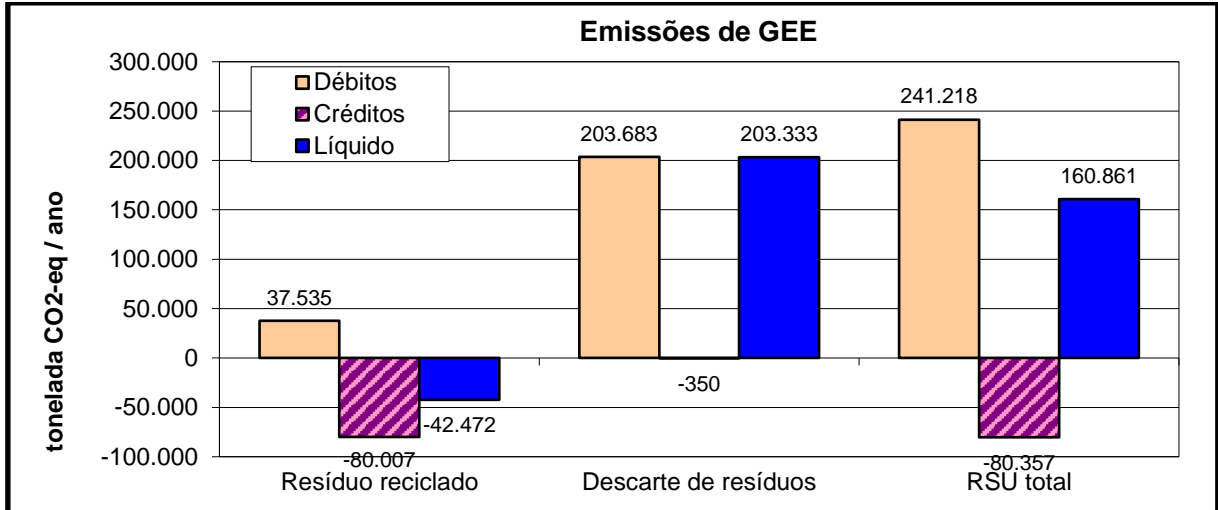


Figura 33 – Resumo das emissões no cenário-base 2
Fonte: BRASI, 2021.

A redução no descarte, ou disposição, de 350 toneladas de CO₂ eq/ano se dá pela geração de energia através do gás coletado pelo aterro. O resultado líquido é 33% menor que os débitos totais, não há créditos nesse cenário.

5.2.2.1.2 Detalhamento do cenário 2.1

O Cenário 2.1 mantém as proporções de reciclagem do Cenário-base 2 e os compostos orgânicos são recuperados através da digestão anaeróbia. A destinação também se mantém a mesma para a comparação da emissão entre compostagem e digestão anaeróbia. A Figura 34 mostra as emissões para cada etapa da gestão dos resíduos.

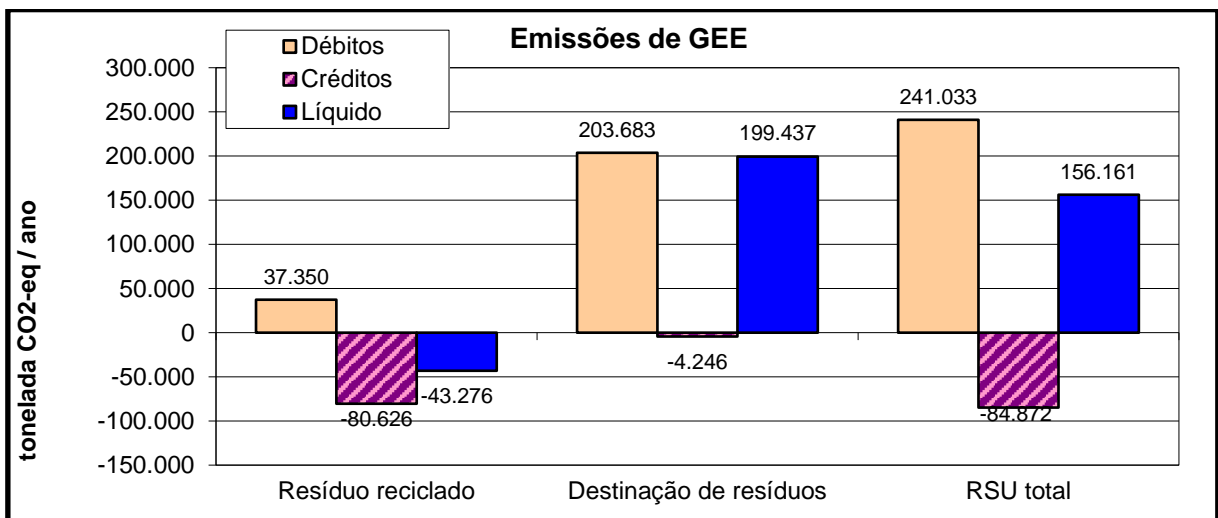


Figura 34 - Resumo das emissões no cenário 2.1
Fonte: BRASI, 2021.

Tabela 15 - Emissões quanto à reciclagem e descarte de resíduos no Cenário 1.

	Emissões	Emissões evitadas	Resultados líquidos
Resíduos reciclados			
Resíduos de alimentos	2.260	-1.021	1.240
Resíduos de jardins e parques	1.069	-483	586
Papel, papelão	23.292	-28.707	-5.415
Plásticos	8.043	-37.464	-29.421
Vidros	2.072	-2.590	-518
Metais ferrosos	132	-3.544	-3.411
Alumínio	481	-6.817	-6.336
Tratamento e disposição final de resíduos			
Aterro sanitário	203.683	-4.246	199.437
Total	241.033	-84.976	156.161

Fonte: BRASI, 2021.

A digestão anaeróbia reduz as emissões em 804 toneladas de CO₂ eq/ano em comparação à compostagem, uma redução de 0,5% em relação à compostagem. Uma mudança positiva foi a mudança na disposição final, que no cenário 1 utilizava a geração de eletricidade através do aterro para a produção de biometano. Somente essa alteração rendeu um crédito de -350 para -4.246 toneladas de CO₂ eq/ano, ou seja, 12 vezes menos emissões quando adotada a produção de biometano ao invés da geração de energia. Isso ocorre pelo fato do mix de geração de energia do Brasil ser mais limpo por contar com geração de energias renováveis e por isso as emissões evitadas na geração de energia não são altas.

5.2.2.1.3 Detalhamento do cenário 2.2

A alteração do cenário 2.2 em relação ao cenário 2.1, consiste na produção de biometano ao invés da produção de eletricidade na etapa de reciclagem. O resultado se mostrou favorável à mudança retornando uma menor emissão com a adoção dessa medida. A Tabela 16 detalha as emissões na reciclagem e descarte.

Tabela 16 - Emissões quanto à reciclagem e descarte de resíduos no Cenário 2

	Emissões *	Emissões evitadas*	Resultados líquidos*
Resíduos reciclados			
Resíduos de alimentos	2.260	-5.700	-3.439
Resíduos de jardins e parques	1.069	-2.696	-1.627
Papel, papelão	23.292	-28.707	-5.415

Plásticos	8.043	-37.464	-29.421
Vidros	2.072	-2.590	-518
Metais ferrosos	132	-3.544	-3.411
Alumínio	481	-6.817	-6.336
Tratamento e disposição final de resíduos			
Aterro sanitário	101.841	-175	101.666
Trat. biol + cobertura at.	2.776	-16.212	-13.436
Total	141.968	-103.905	38.063

*: Resultados em toneladas de CO₂-eq/ano
 Fonte: BRASI, 2021.

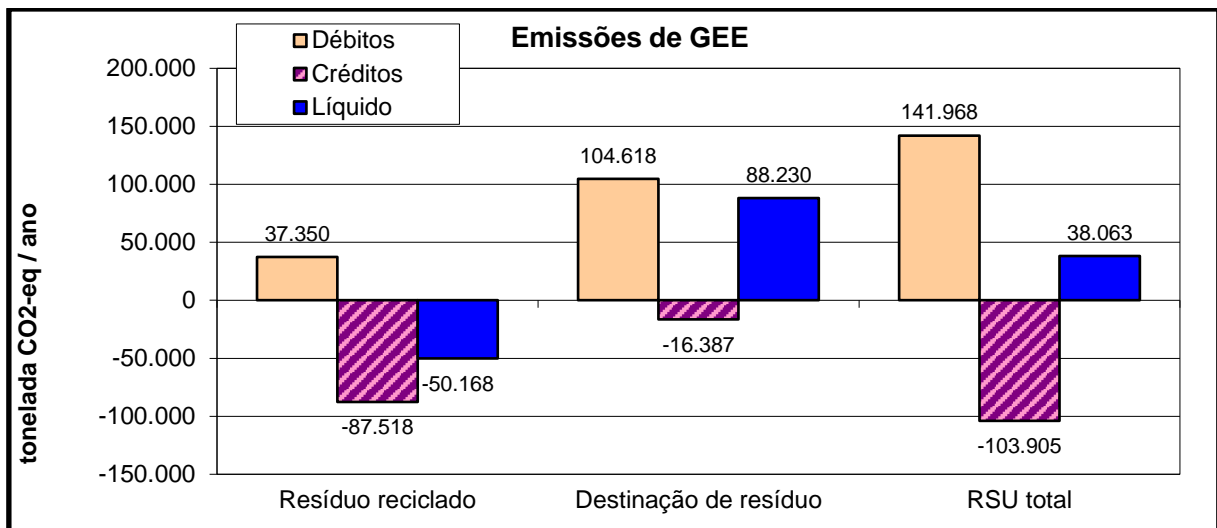


Figura 35 - Resumo das emissões no cenário 2.2
 Fonte: BRASI, 2021.

O cenário 2.2 é muito promissor, e a principal razão é o tratamento biológico com a produção de biometano. Todas as simulações com mudança entre geração de energia e produção de biometano foram favoráveis ao biometano. A principal razão, já exposta anteriormente, se dá pela adoção de matrizes renováveis no mix de eletricidade brasileira, que emitem pouco CO₂ e por isso as emissões evitadas não apresentam grandes vantagens como a produção do biometano.

5.2.2.1.4 Detalhamento do cenário 2.3

O cenário 2.3 foi o único que gerou créditos na emissão de carbono. Esse cenário simula a recuperação de 100% dos resíduos passíveis de reciclagem da massa total. Na destinação final da fração não reciclável, nenhuma fração foi enviada ao aterro sanitário,

ficando 50% dos rejeitos para o tratamento biológico e cobertura de aterro e na produção de CDR seco na cimenteira, mais tratamento biológico e mais cobertura de aterro. A Figura 36 representa as emissões nas diferentes etapas da gestão dos resíduos sólidos simulada.

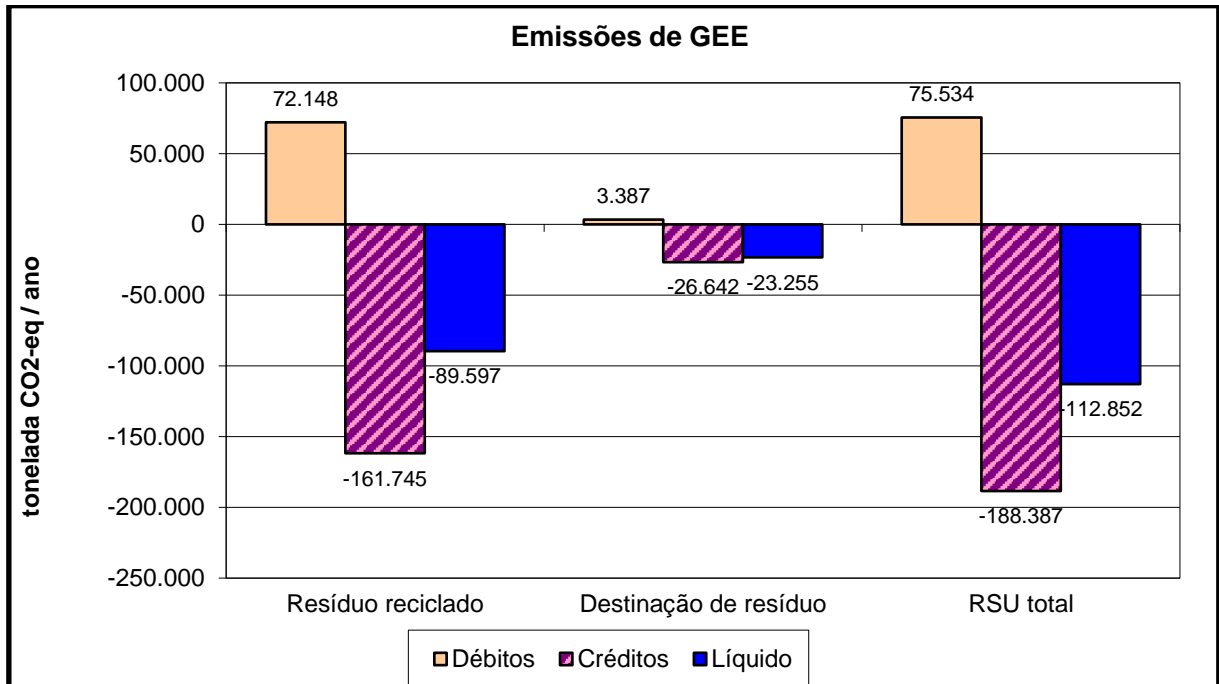


Figura 36 - Resumo das emissões no cenário 2.3
Fonte: BRASI, 2021.

A Tabela 17 detalha as emissões nas etapas de reciclagem e destinação do cenário 2.3.

Tabela 17 - Emissões quanto à reciclagem e descarte de resíduos no Cenário 3

	Emissões*	Emissões evitadas*	Resultados líquidos*
Resíduos reciclados			
Resíduos de alimentos	2.788	-2.376	412
Resíduos de jardins e parques	1.318	-1.124	195
Papel, papelão	46.584	-57.414	-10.830
Plásticos	16.086	-74.928	-58.843
Vidros	4.144	-5.181	-1.036
Metais ferrosos	265	-7.088	-6.823
Alumínio	962	-13.634	-12.672
Destinação de resíduos			
Trat. biol + cobertura at.	1.516	-776	740
CDR seco + trat. biol.	1.871	-25.866	-23.995
Total	75.534	-188.387	-112.852

*: Resultados em toneladas de CO2-eq/ano

Fonte: BRASI, 2021.

6 CONCLUSÃO

A destinação ao aterro sanitário, tecnologia amplamente utilizado na gestão dos resíduos sólidos no Brasil, é uma opção que vai contra as metas mundiais de redução de emissões dos gases do efeito estufa. Países como a Alemanha, que divide conhecimento com o Brasil em várias frentes, inclusive com a parceria na elaboração da ferramenta utilizada nesse estudo, estão muito mais avançados em inovações na gestão dos resíduos que garantam maior eficiência e aproveitamento que os RSU podem oferecer.

Os diversos planos nacionais, como o PLANARES, estudos como os realizados pelo Instituto 17 que vão de encontro com o potencial de descarbonização e de aproveitamento energético na gestão dos RSU, as consolidações das iniciativas que criam o mercado de créditos de carbono, dão base para o Brasil avançar em melhorias e inovações no que se refere a uma melhor destinação e tratamento dos resíduos gerados.

Durante as análises aqui apresentadas confirmou-se relevantes premissas acerca de alguns pontos a serem citados. O primeiro ponto é que o potencial de redução das emissões do Combustível Derivado de Resíduo – CDR, que substitui derivados de petróleo no coprocessamento do clínquer em cimenteiras, é amplamente viável e justamente por isso esse setor já está mais avançado em estudos e implementações.

Outro ponto é o potencial da redução das emissões através da produção de biometano a partir do biogás na digestão anaeróbia e tratamento biológico, nos cenários avaliados com a troca de geração de eletricidade por produção de biometano.

A substituição de geração de energia por produção de biogás na digestão anaeróbia resultou em uma redução de 8,6% nas emissões de GEE.

Incrementando-se os percentuais de reciclagem das frações de resíduos secos e orgânicos a 50% de toda a massa atual de resíduos, obtém-se uma redução nas emissões de GEE de aproximadamente 50,6% em relação ao cenário de gestão atual.

Segundo o IPCC (2006), para uma área de florestas naturais da América do Sul de até 20 anos de idade, a taxa de captura de carbono é de 7,3253 tCO₂/ha/ano. Considerando a emissão atual de GEE do município de Florianópolis, seriam necessários o reflorestamento de 44.443,00 hectares de florestas naturais, valor equivalente a 53.870 campos de futebol para neutralizar a emissão de CO₂ em um ano.

Referente a pontos específicos aqui mencionados nas análises, quanto à particularidade de alguns materiais apresentarem melhor desempenho na redução das emissões, cabe destaque

aos metais ferrosos seguido do alumínio. As emissões evitadas através da reciclagem desses materiais são as mais elevadas em comparação com todas as demais frações recicladas. Em seguida vem os plásticos e depois papel e papelão juntamente com os vidros na mesma proporção de redução das emissões.

Os resultados indicam que a rota tecnológica do aproveitamento energético através do biometano é a maneira mais eficiente na redução das emissões de GEE no município de Florianópolis, sempre respeitando a hierarquia da PNRS, que norteiam a legislação municipal.

Como sugestão de prosseguimento do trabalho, a checagem das discrepâncias entre os resultados do *software* SWARM elaborado por Luiz (2002) com a Calculadora de Emissões de GEE elaborado pela ProteGEEr. Para o SWARM foi delimitado um limite que não é possível simular na Calculadora de Emissões de GEE, ainda que a massa e a gravimetria tenham sido semelhantes.

Por fim, a Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil, se mostrou uma prática maneira de estimar as reduções e fomentar um norteamento na gestão dos resíduos sólidos. Os produtos gerados pela ferramenta, gráficos, tabelas e gráficos, facilitam a visualização do resultado para comparação entre tantos cenários. A facilidade de se manusear a ferramenta e seu manual são outros pontos que trazem benefícios aos usuários da Calculadora.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Jürgen Giegrich. Cooperação Para A Proteção do Clima na Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos – Protegeer. **Manual da Calculadora de Emissões de GEE para Resíduos: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil: metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV)**. Brasília: Protegeer, 2021.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares** [recurso eletrônico] / coordenação de André Luiz Felisberto França... [et. al.]. – Brasília, DF: MMA, 2022.

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method For Estimating Greenhouse Gas Emission Reductions from Diversion of Organic Waste from Landfills to Compost Facilities**. California. 2017.

CHAVES, Gisele de Lorena Diniz; SIMAN, Renato Ribeiro; CHANG, Ni-Bin. **Rede Logística Reversa para Combustível Derivado de Resíduos**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 34°. On-Line: Anpet, 2020. p. 1653-1665. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais34/documentos/2020/Log%C3%ADstica/Log%C3%ADstica/3_206_AC.pdf. Acesso em: 25 out. 2022.

CROVADOR, Maria Isabel Coltro et al. **Estimativa Da Produção de Biogás em Aterro Sanitário Subtropical Brasileiro**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, Maringá -Pr, v. 1, n. 11, p. 227-251, 02 MAR. 2017.

Cuhls et al. (2015), Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen, Carsten Cuhls, Birte Mähl, Joachim Clemens, gewitra Ingenieurgesellschaft für Wissenstransfer mbH, im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 206 33 326, 3709 44 320, TEXTE 39/2015

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). (2008) **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos de Campo Grande, MS**. Rio de Janeiro: EPE. 73 p. (Série Recursos Energéticos.)

INSTITUTO 17 (Brasil). Programa de Energia Para O Brasil – Bep (Brasil). **Aproveitamento energético de RSU no Brasil: Potencial de descarbonização por arranjo tecnológico**. São Paulo: Instituto 17, 2022.

IPCC. Vol. 4 AFOLU - **Chapter 4 Forest Land. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. , 2006

LAURENT, Alexis et al. **Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I: lessons learned and perspectives**. Waste Management, [S.L.], v. 34, n. 3, p. 573-588, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.045>.

LIIKANEN, Miia; HAVUKAINEN, Jouni; VIANA, Ednilson; HORTTANAINEN, Mika. **Steps towards more environmentally sustainable municipal solid waste management – A life cycle assessment study of São Paulo, Brazil**. Journal Of Cleaner Production, [S.L.], v. 196, p. 150-162, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.005>.

LUIZ, Bruno Vieira. **Análise de Emissões de Gases de Efeito Estufa dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Florianópolis a Partir da Proposição de Cenários de Valorização de Resíduos**. 2022. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Clima e Ambiente, Programa de Mestrado Profissional em Clima e Ambiente, Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Florianópolis, 2022.

MORETTO, Sara Rachel Orsi; FERNANDES, João Carlos. **Tecnologias para o Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Demandas Essenciais Para O Avanço da Engenharia Sanitária e Ambiental 3, [S.L.], p. 186-205, 21 jan. 2020. Atena Editora. <http://dx.doi.org/10.22533/at.ed.48620210118>.

MOURAD, A. L.; GARCIA, E. E. C.; VILHENA, A. **Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Aplicações**. Campinas: CETEA/CEMPRE, 92p. 2002.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. (org.). **Desafios e Oportunidades para Redução das Emissões de Metano no Brasil**. Salinópolis, Pará: 2022. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/Estudo_Metano/ObsClima_SEEG2022_FINAL.pdf. Acesso em: 05 nov. 2022.

PANEPINTO, D.; ZANETTI, M.C.. **Municipal solid waste incineration plant: a multi-step approach to the evaluation of an energy-recovery configuration**. Waste Management, [S.L.], v. 73, p. 332-341, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.036>.

PIAIA, Eduarda. **Uso de Rejeitos da Coleta Seletiva de Materiais Recicláveis para Produção de Combustível Derivado de Resíduos - CDR**. 2021. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

PMF - PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. **Plano Municipal de Coleta seletiva, Relatório Parcial 2 – Caracterização dos Resíduos Sólidos de Coleta Convencional e Seletiva**. 2016.

RASI, S.; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, J. **Trace compounds affecting biogas energy utilisation – a review**. Energy Conversion and Management, v.52, n.12, p.3369–3375, 2011

SANTOS, M. F. N. dos **A importância da avaliação do ciclo de vida na análise de produtos: possíveis aplicações na construção civil**. São Paulo: GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas – Ano 6, nº2, Abr-Jun/2011, p. 57-73.

SILVA, Hellen Luisa de Castro e et al. **Gerenciamento de resíduos sólidos orgânicos do Consórcio do Maciço de Baturité: análise técnica e econômica da geração de biogás por aterro sanitário e usina de digestão anaeróbia**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, [S.L.], v. 26, n. 5, p. 855-864, out. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220200155>.

SOARES, Fabio Rubens; MIYAMARU, Emília Satoshi; MARTINS, Gilberto. **Desempenho ambiental da destinação e do tratamento de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético por meio da avaliação do ciclo de vida na Central de Tratamento de Resíduos - Caieiras**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, [S.L.], v. 22, n. 5, p. 993-1003, out. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017155522>.

Stafford, F. N.; Raupp-Pereira, F.; Labrincha, J. A.; Hotza, D. (2016). **Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study**. Journal of Cleaner Production, 137, 1293-1299

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). (2022) **LFG Energy Project Development Handbook**. Washington: Landfill Methane Outreach Program. 96 p. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-11/documents/pdh_full.pdf. Acesso em: 10 out. 2022.