



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

Yuri Lucian Pilissão

Gestão integrada e sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos visando à recuperação energética: um estudo de caso no município de Ijuí/RS

Araranguá, SC
2023

Yuri Lucian Pilissão

Gestão integrada e sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos visando à recuperação energética: um estudo de caso no município de Ijuí/RS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientadora: Profa. Dra. Elaine Virmond
Coorientadora: Profa. Dra. Elise Sommer Watzko

Araranguá, SC

2023

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

Pilissão, Yuri Lucian
Gestão integrada e sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos visando à recuperação energética: : Um estudo de caso no município de Ijuí/RS / Yuri Lucian Pilissão ; orientador, Elaine Virmond, coorientador, Elise Sommer Watzko, 2023.
136 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade, Araranguá, 2023.

Inclui referências.

1. Energia e Sustentabilidade. 2. Hierarquia de resíduos. 3. Valorização de resíduos. 4. Sustentabilidade. 5. Fonte alternativa de energia. I. Virmond, Elaine. II. Watzko, Elise Sommer. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade. IV. Título.

Yuri Lucian Pilissão

Gestão integrada e sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos visando à recuperação energética: um estudo de caso no município de Ijuí/RS

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 25 de janeiro de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa Elaine Virmond, Dra
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Profa Kátia Madruga, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Caroline Rodrigues, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Profa Elaine Virmond, Dra
Orientadora

Araranguá, SC
2023

Dedico este trabalho ao meu pai Heitor Geolar Pilissão (*in memoriam*) que partiu para outro plano em meio a essa caminhada. Todos os teus ensinamentos fazem parte dessa trajetória. Gratidão eterna a tudo que fez por nós.

AGRADECIMENTOS

O meu agradecimento especial a minha orientadora Elaine, pela dedicação e paciência em conduzir este trabalho durante o período pandêmico de COVID-19 que tanto nos afetou. O distanciamento físico não impediu que sempre me orientasse na direção correta. Dona de um profissionalismo que me ensinou a ter disciplina, ela não desistiu da condução desse trabalho, mesmo nos momentos de desafio. Por muitas vezes pensei não ser capaz, mas você me incentivou a continuar.

A professora Elise, por toda a contribuição que teve no alinhamento deste trabalho.

Aos colegas do Núcleo de Pesquisa, Desenvolvimento, Aplicações e Avaliação de Processos de Produção de Energia (NUDAPE), especialmente Adilson, pelas trocas de experiência. Um excelente profissional; muito mais que um colega, foi uma referência.

Ao Programa de Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGES) em especial, gostaria de agradecer aos professores e profissionais pela disponibilidade e conhecimento técnico adquirido.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado.

À minha família pela paciência nestes dias de ausências, especialmente à minha amada companheira Fernanda, pelos intermináveis finais de semana de muita leitura e estudo. Agradeço pela motivação e força para continuar, essa etapa também é para você e para o maior presente, o nosso baby Ben.

Deixo um agradecimento especial para meu pai, por toda a lição de vida que me deste, por toda a dedicação e cuidado conosco, infelizmente a vida nos tirou deste plano, mas continuamos na luta e essa conquista é para ti também.

À minha mãe, professora, guerreira, que sempre me incentivou para que continuasse meus estudos e me conduziu a ser um amante da educação, obrigado por acreditar em mim. Ao meu irmão caçula Igor, por não deixar a vida nos abater, você é fruto da videira e dono de um coração do tamanho do mundo. Obrigado pela compreensão e por todo o amor incondicional que recebi de todos vocês.

À Prefeitura Municipal de Ijuí, obrigado pela oportunidade de realizar esse estudo. Aos colegas e servidores da Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMMA),

por todo o auxílio e contribuição com esse estudo, em especial a Luis Fernando, Joice, Franciele e Tássia, vocês não mediram esforços em contribuir com esse trabalho.

Agradeço a todos aqueles que contribuíram de forma direta e indireta com esse trabalho, o meu muito obrigado.

RESUMO

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) sempre foram algo indesejável em nossa sociedade, sendo seu gerenciamento e destinação um desafio que aumenta a cada ano. A má gestão dos resíduos gera uma série de problemas, seja pela contaminação do meio ambiente, seja pela sua capacidade de servir de vetor para organismos patogênicos. Dessa forma, há necessidade de uma análise da situação do gerenciamento de RSU, na qual se busca a maior capacidade de reutilização e geração de novos recursos. Nesse contexto, este trabalho objetivou analisar os aspectos ambientais, econômicos e energéticos do sistema de gerenciamento de RSU do município de Ijuí/RS, Brasil, e seus métodos de tratamento como, coleta, transporte e destinação de forma integrada aos demais níveis da hierarquia de gestão de resíduos (não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos). Para tanto, a composição gravimétrica dos RSU do município foi determinada. Os impactos ambientais e energéticos dos cenários considerados foram avaliados por meio do *Waste Reduction Model* (WARM), Modelo de Redução de Resíduos da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Já os impactos econômicos foram quantificados a partir da análise de dados fornecidos pela Prefeitura Municipal de Ijuí/RS e dos órgãos responsáveis pela gestão dos RSU. A literatura científica sobre o tema em estudo foi verificada, servindo de subsídio para indicação de processos a serem utilizados em empresas da área de saneamento básico e prefeituras, que poderão ser beneficiadas a partir de investimentos que incorrerão na geração de produtos de maior valor agregado, criando um elo na sua cadeia de negócios. Os resultados do estudo apontaram os benefícios ambientais, energéticos e econômicos que podem ser gerados pela redução de volume e despesas das administrações municipais com a produção de combustível derivado de resíduos (CDR) e a recuperação energética. Ao se relacionar a energia consumida para o descarte em aterros com a reciclagem dos materiais, observou-se um ganho de energia por tonelada no processo de reciclagem dos materiais, indicando que a reciclagem é a melhor forma de evitar emissões atmosféricas de Gases de Efeito Estufa (GEE) e que há potencial de expansão da reciclagem de aproximadamente de 54% de acordo com a análise gravimétrica deste estudo. Os impactos ambientais gerados pela emissão de GEE pelo método de aterramento foram de 23.824,91 milhões de toneladas de CO₂ equivalente com o processo de transporte e destinação final dos RSU em aterro sanitário sem captura e aproveitamento do biogás. Com base em todos os pressupostos apresentados neste trabalho, torna-se relevante promover práticas mais sustentáveis no gerenciamento de RSU em Ijuí/RS, instituindo mecanismos e políticas públicas que possam promover a implementação da economia circular e a recuperação energética de RSU.

Palavras-chave: Hierarquia de resíduos; Valorização de resíduos; Sustentabilidade; Fonte alternativa de energia.

ABSTRACT

Municipal Solid Waste (MSW) has always been something undesirable in our society, and its management and disposal is a challenge that increases every year. Poor waste management generates a series of problems, either by contaminating the environment or by its ability to serve as a vector for pathogens. Thus, there is a need for an analysis of the MSW management situation, in which a greater capacity for reuse and generation of new resources is sought. In this context, this study aimed to analyze the environmental, economic and energy aspects of the MSW management system in the municipality of Ijuí/RS, Brazil, and its treatment methods such as collection, transportation and disposal in an integrated way with the other levels of the waste management hierarchy (non-generation, reduction, reuse, recycling, treatment and final disposal of waste). To this end, the gravimetric composition of the municipality's MSW was determined. The environmental and energy impacts of the scenarios considered were evaluated by means of the Waste Reduction Model (WARM), of the United States Environmental Protection Agency. The economic impacts were quantified from the analysis of data provided by the Municipal Government of Ijuí/RS and the agencies responsible for MSW management. The scientific literature on the subject under study was verified, serving as a subsidy to indicate processes to be used in companies in the area of basic sanitation and municipalities, which may be benefited from investments that will incur in the generation of products with higher added value, creating a link in their business chain. The results of the study pointed out the environmental, energy and economic benefits that can be generated by reducing the volume and expenses of municipal administrations with the production of waste-derived fuel (RDF) and energy recovery. When relating the energy consumed for the disposal in landfills with the recycling of the materials, it was observed an energy gain per ton in the recycling process of the materials, indicating that recycling is the best way to avoid atmospheric emissions and there is a potential for expansion of recycling of approximately 54% according to the gravimetric analysis of this study. The environmental impacts generated by the emission of greenhouse gases by the landfill method were 23.824,91, million tons of CO₂ equivalent with the process of transportation and final disposal of MSW in landfill without capture and use of biogas. Based on all the assumptions presented in this study, it becomes relevant to promote more sustainable practices in MSW management by instituting mechanisms and public policies that may promote the implementation of the circular economy and the energy recovery of MSW.

Keywords: Waste hierarchy; Waste valorization; Sustainability; Alternative energy source.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Hierarquia de gestão de resíduos	24
Figura 2 - Gestão de RSU nos Estados Unidos em 2018	33
Figura 3 - Tecnologias de Recuperação Energética de Resíduos	35
Figura 4 - Linha de processamento de CDR	45
Figura 5 - Fluxograma das etapas da pesquisa	58
Figura 6 - Localização de Ijuí/RS.....	60
Figura 7 - Plano de gestão integrada de resíduos sólidos, Ijuí/RS.....	61
Figura 8 - Mapa da coleta de RSR nas áreas urbana e rural de Ijuí/RS.....	63
Figura 9 – Aplicativo Ijuí Lixo Zero.....	64
Figura 10 - Sede da Associação de Catadoras de Materiais Recicláveis (ACATA) e Associação de Recicladores da Linha 6 (ARL)	66
Figura 11 - Estação de Transbordo	68
Figura 12 - Pesagem do caminhão da coleta seletiva	70
Figura 13 - Etapas de amostragem de RSD	71
Figura 14 - Destinação final dos RSU de Ijuí/RS em 2021 por tipo de destinação (t/ano)	82
Figura 15 - Quantitativo mensal coletado - jan./2021 a dez.2021	83
Figura 16 - Controle diário de coleta de RSU - agosto 2021	84
Figura 17 - Composição dos materiais recuperados na triagem dos resíduos de Ijuí/RS	85
Figura 18 - Composição gravimétrica média dos RSD de Ijuí/RS.....	89
Figura 19 - Análise das emissões de gases de efeito estufa e do ciclo de vida dos produtos no cenário base em milhões de toneladas de CO _{2e}	95
Figura 20 - Análise das emissões de gases de efeito estufa e o ciclo de vida dos produtos recicláveis no cenário base em milhões de toneladas de CO ₂	97
Figura 21 - Análise do ciclo de vida do produto e uso de energia.....	100
Figura 22 - Resultados de emissões de GEE em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO _{2e}) para o desvio de 30% dos RSU para a reciclagem.....	105
Figura 23 - Análise do consumo de energia para o aumento da reciclagem.....	107
Figura 24 - Cenário de expansão de compostagem e redução de emissões em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO ₂) e cenários alternativos.....	110

Figura 25 - Expansão da digestão anaeróbica e redução das emissões de GEE em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO ₂).....	112
Figura 26 - Consumo energético para a implantação de sistema de digestão anaeróbica em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO ₂)	114
Figura 27 - Análise das emissões para o cenário de combustão em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO ₂).....	116
Figura 28 - Consumo de energia para os cenários de conversão térmica dos RSU	118
Figura 29 - Redução das emissões atmosféricas de GEE em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO ₂) para o cenário 5 - "lixo zero"	120
Figura 30 - Economia de energia em BTU para o cenário 5 - "lixo zero"	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição gravimétrica média dos RSU no Brasil	27
Tabela 2 - Gravimetria dos RSU no Estado do RS	28
Tabela 3 - Composição do RSU do município Ijuí (Revisão do PLANSAB 2018)	29
Tabela 4 - Caracterização dos resíduos da coleta seletiva em Ijuí	29
Tabela 5 - Poder Calorífico Inferior de alguns dos materiais encontrados nos RSU.	31
Tabela 6 - Cenários base e alternativos considerados na gestão dos resíduos de Ijuí/RS	74
Tabela 7 - Destinação dos RSU cidade de Ijuí/RS	81
Tabela 8 - Materiais Recicláveis dos RSU cidade de Ijuí/RS	85
Tabela 9 - Resultado da análise gravimétrica dos resíduos domiciliares e rejeitos das associações na cidade de Ijuí	87
Tabela 10 - Diagnóstico e despesas do município de Ijuí/RS em 2021 com o manejo de RSU	90
Tabela 11 - Fluxo de resíduos nos cenários base e alternativos	92
Tabela 12 - Dados de entrada no WARM por tipo de resíduos.....	93
Tabela 13 - Configuração do fluxo de RSU.....	115
Tabela 14 - Valores de gestão de resíduos para o cenário 5 - "lixo zero"	119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critérios para a escolha de tecnologia para gerenciamento de RSU	49
Quadro 2 - Parâmetros de avaliação para a gestão dos RSU	50
Quadro 3 - Síntese do referencial teórico utilizado	57
Quadro 4 - Impactos do ciclo de vida e emissões de GEE no cenário base em MTCO ₂	93
Quadro 5 - Impactos Energéticos no Cenário Base (BTU).....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACATA	Associação de Catadoras de Materiais Recicláveis de Ijuí
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ARL6	Associação de Recicladores da Linha 6 Leste
BTU	Unidades Térmicas Britânicas
BMT	<i>Tratamento Mecânico Biológico</i>
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
DA	Digestão Anaeróbia
EEC	<i>Earth Engineering Center</i>
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul
GEE	Gases de Efeito Estufa
GSIR	Gestão Sustentável Integrada de Resíduos
ISWA	<i>International Solid Waste Association</i>
ITECSOL	Incubadora de Economia Solidária, Desenvolvimento e Tecnologia Social
MTB	<i>Mechanical Biological Treatment</i>
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organizações das Nações Unidas
PCI	Poder Calorífico Inferior
PLAMSAB	Plano Municipal de Saneamento Básico do município de Ijuí/RS
PLANARES	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PMGIRS	Plano Municipal de Gerenciamento Integrada de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCC	Resíduos da Construção Civil
REI	<i>Recycling Economic Information</i>
RS	Estado do Rio Grande do Sul
RSD	Resíduos Sólidos Domiciliares
RSR	Resíduos Secos e Recicláveis

RSS	Resíduos de Serviços de Saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SLU	Serviço de Limpeza Urbana
SMMA	Secretaria Municipal de Meio Ambiente
SNIS	Sistema Nacional de Informação de Saneamento
SRF	<i>Solid Recovered Fuels</i>
TCE/RS	Tribunal de Contas do Estado do Rio Grande do Sul
TMB	Tratamento Mecânico Biológico
UNIJUÍ	Universidade do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
URE	Usina de Recuperação de Energia
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
WARM	<i>Waste Reduction Model</i>
WtE	<i>Waste-to-Energy</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	20
2.1. OBJETIVO GERAL	20
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1. GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	21
3.2. GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	25
3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	26
3.4. PROCESSOS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	32
3.5. TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DOS RSU	35
3.5.1. COMBUSTÃO	37
3.5.2. GASEIFICAÇÃO E PIRÓLISE	38
3.5.3. DIGESTÃO ANAERÓBICA	39
3.5.4. PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO	41
3.5.5. TRATAMENTO MECÂNICO BIOLÓGICO (TMB)	46
3.6. ESCOLHA DAS MELHORES ALTERNATIVAS DE GERENCIAMENTO	49
3.7. HIERARQUIA DE GESTÃO DE RESÍDUOS	51
3.8. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	53
3.8.1. MODELO DE REDUÇÃO DE RESÍDUOS - WARM	54
3.9. SÍNTESE DO REFERENCIAL TEÓRICO	55
4. METODOLOGIA	58
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	59
4.2. PANORAMA DA GESTÃO DE RSU EM IJUÍ/RS	61
4.2.1. Resíduos sólidos domiciliares e resíduos secos recicláveis	62
4.2.2. Associações de recicladores	65
4.2.3. Resíduos de serviço de saúde, industriais, eletrônicos e da construção civil	66
4.2.4. Transbordo municipal	67
4.2.5. Destinação final dos RSU	68
4.3. COLETA DE DADOS	68
4.3.1. Determinação da composição gravimétrica dos RSU	69

4.4. CENÁRIOS CONSIDERADOS	72
4.4.1. Expansão do programa de coleta seletiva e incentivo à reciclagem	75
4.4.2. Expansão de programa de incentivo à compostagem.....	75
4.4.3. Implantação de sistema de digestão anaeróbica	75
4.4.4. Recuperação energética dos rejeitos.....	76
4.4.5. Redução e desvio da destinação ao aterro sanitário	76
4.5. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS	77
4.5.1. Avaliação dos impactos ambientais.....	77
4.5.2. Avaliação dos impactos energéticos	78
4.5.3. Avaliação dos impactos econômicos	79
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
5.1. GERAÇÃO DE RSU.....	83
5.2. COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA.....	86
5.3. DADOS FINANCEIROS	89
5.4. AVALIAÇÃO DOS CENÁRIOS BASE E ALTERNATIVOS NO WARM	91
5.4.1. Análise dos Impactos ambientais da gestão de RSU no cenário base	93
5.4.2. Análise dos impactos energéticos da gestão de RSU no cenário base ...	98
5.4.3. Análise dos impactos econômicos da gestão de RSU no cenário base	101
5.4.4. Análise dos impactos para a expansão dos programas de gestão alternativa dos RSU.....	102
5.4.5. Impactos ambientais.....	102
5.4.6. Impactos energéticos	106
5.4.7. Impactos econômicos	108
5.4.8. Expansão do programa de reciclagem dos RSU	109
5.4.9. Expansão de programa de compostagem dos RSU	109
5.4.10. Implantação de sistema de biodigestão anaeróbica.....	111
5.4.11. Recuperação energética dos rejeitos - Combustão	115
5.4.12. Redução e desvio dos RSU do aterro sanitário - Cenário 5 – ideal, lixo zero.....	119
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
7. REFERÊNCIAS.....	125

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, os resíduos sólidos sempre foram um resultado indesejável da maioria das atividades humanas e diversos fatores, como crescimento populacional, globalização e urbanização aumentaram a sua quantidade e diversidade (CHEN et al., 2014).

A pandemia causada pelo Coronavírus, expôs o tamanho do desafio que o mundo enfrentou para manter uma situação dramática sob controle. Estimativas mostram que, durante o período de emergência sanitária decorrente da Pandemia de COVID-19, e em função das medidas de quarentena, houve um aumento na geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no país. Por conta desse caráter de essencialidade, a boa gestão de Resíduos Sólidos Urbanos constitui-se, juntamente com os serviços de atendimento à saúde e de saneamento básico (como tratamento de água e esgoto), uma das principais barreiras sanitárias contra a transmissão de novas doenças.

Dados do Panorama dos Resíduos Sólidos Brasil apontam que a geração de RSU no país cresceu 4% no ano de 2020 (ABRELPE, 2021), atingindo 225.965 toneladas por dia. Isso significa que, em média, cada brasileiro gerou pouco mais de 1,07 kg de resíduos por dia, com geração total de 82,5 milhões de toneladas de RSU em 2020.

Atualmente, aterros sanitários prevalecem como principal forma de destinação dos RSU coletados no Brasil, sendo 59% dos materiais coletados enviados para estes locais, o que representa um alto custo financeiro para os municípios do país; o restante (40%) é descartado em locais inadequados, como lixões ou aterros controlados, que não possuem um conjunto de sistemas e medidas necessárias para proteger a saúde das pessoas e do meio ambiente (ABRELPE, 2021). Apenas 4% dos RSU brasileiros foram reciclados e destinados à compostagem em 2018 (ANCAT, 2019).

No Estado do Rio Grande do Sul, foram coletadas 3.021,298 toneladas de RSU, uma média de geração *per capita* de 0,79 kg/habitante.dia entre os 451 municípios que responderam aos questionários do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (BRASIL, 2019). A composição média por faixas populacionais dos municípios gaúchos foi de 60% de matéria orgânica, 25% de material seco reciclável e 15% de rejeito conforme a Fundação Estadual do Meio Ambiente do Rio

Grande do Sul (RIO GRANDE DO SUL, 2014). Quanto à destinação dos resíduos sólidos no RS, em 2018, 79,9% dos municípios destinaram seus resíduos de forma correta para aterros sanitários (ZAGONEL, 2019).

O município de Ijuí, localizado no Noroeste do estado do Rio Grande do Sul, foi escolhido devido ao interesse do autor na busca de soluções para o gerenciamento de seus RSU. No ano de 2022, houve um incêndio no antigo lixão municipal, fato que demonstra a necessidade de soluções eficientes para a destinação final de RSU.

Com uma população de aproximadamente 85 mil habitantes, no ano de 2021 foram coletadas aproximadamente 17.644,59 toneladas de RSU, uma média mensal de 1.481 toneladas de resíduos sólidos domiciliares, que equivalem, aproximadamente, a uma geração de 0,6 kg/hab.dia (SMMA, 2021).

A SMMA é o órgão responsável pela gestão destes resíduos, e dispõe de serviços englobando, coleta, transporte, transbordo e disposição final, assim segmentados: resíduos sólidos domiciliares e recicláveis. Assim como no restante do país, o aterro sanitário prevalece como a principal destinação dos resíduos produzidos no município (SMMA, 2021).

Na média nacional de 2019, foram aplicados R\$ 10,75 por habitante/mês e R\$ 130,00 por habitante/ano nos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos. Na região sul a média foi de R\$ 8,48 por habitante/mês e o mercado de limpeza urbana movimentou recursos correspondentes a R\$ 28,1 bilhões no país nesse mesmo ano segundo dados divulgados no panorama da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2020).

Como resposta a tais problemas, diversos países desenvolveram métodos e tecnologias para lidar com a gestão dos resíduos sólidos, que variam desde a redução por meio de *design* de produtos e embalagens, até a reciclagem de materiais que podem ser reaproveitados pela indústria e o comércio, assim como a compostagem de material orgânico e o tratamento térmico com aproveitamento energético, conhecidas como usinas *Waste-to-Energy* (WtE) (TISI, 2019).

Opções alternativas de destinação dos resíduos apontam as usinas de recuperação de energia de resíduos como superiores ao aterro sanitário, após cumprirem as etapas hierárquicas de gestão de resíduos e como um complemento à reciclagem (THEMELIS et al., 2019). A “Hierarquia de Gestão de Resíduos” é uma rota preferencial para a sua gestão em uma escala gráfica apontada pelos estudos do

Centro de Engenharia da Terra (do inglês *Earth Engineering Center* - EEC) da universidade de Columbia, em Nova York.

A **redução** está no topo da hierarquia, e os meios disponíveis para gerenciar os resíduos gerados podem ser divididos em categorias como: **reciclagem**, que inclui reaproveitamento de alguns produtos materiais como (metais, papel, plástico e vidro); **compostagem** que envolve a digestão anaeróbica e aeróbica de orgânicos, como alimentos e resíduos de “quintal” (grama, folhas, galhos); e os **rejeitos** remanescentes das etapas de triagem de materiais recicláveis, sendo estes alvos da recuperação energética.

Recentemente no Brasil foi aprovada a Lei Federal nº 14.026 de 15 de julho de 2020 (BRASIL, 2020) que atualizou o arcabouço legal do saneamento básico e atualizou os prazos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei Federal nº 12.305 de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), para adequação ambiental na destinação final de rejeitos.

De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2022) (Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022), a intenção é eliminar a destinação final de RSU para lixões e aterros controlados até o ano de 2024 (BRASIL, 2022). A Portaria Interministerial, 274, de 30 de abril de 2019 (BRASIL, 2019), disciplina a recuperação energética dos Resíduos Sólidos Urbanos e classifica Usina de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos – URE como qualquer unidade dedicada ao tratamento térmico de RSU como recuperação de energia térmica gerada pela combustão com vista à redução de volume e periculosidade, preferencialmente associada à geração de energia térmica ou elétrica.

Já a Portaria Normativa nº 41, de 14 de abril de 2022, estabeleceu as diretrizes para a realização dos leilões de compra de energia elétrica provenientes de novos empreendimentos de geração, termelétricas de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos, de que trata a Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019 dos Ministérios do Meio Ambiente, de Minas e Energia e do Desenvolvimento Regional.

Transformar resíduos em energia pode ser uma chave para uma economia circular, permitindo que o valor dos produtos, materiais e recursos sejam mantidos no mercado pelo maior tempo possível, minimizando o desperdício e o uso de recursos naturais. Dessa forma, deixa-se de lado o descarte antiquado de resíduos em lixões e aterros para um tratamento de materiais inteligente, englobando a valorização

energética dos resíduos (MALINAYSKAIATE, 2017). Dadas as particularidades dos RSU, são necessários estudos aprofundados acerca do desenvolvimento e da otimização da logística de coleta e tratamento para posterior aplicação em processos de recuperação energética.

Neste estudo foram avaliados os cinco cenários alternativos para a gestão atual dos RSU no município de Ijuí/RS com base nos seguintes critérios: (i) expansão do programa de coleta seletiva e incentivo à reciclagem; (ii) implantação de programa de incentivo à compostagem e à biodigestão; e (iii) avaliação dos cenários alternativos de destinação dos resíduos incluindo-se recuperação energética dos rejeitos da triagem de materiais recicláveis por meio da combustão e o desvio de aterro sanitário.

Para a configuração dos cenários, utilizou-se como referência o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2022), dados da Agência de Proteção Ambiental Americana (*United States Environmental Protection Agency* - USEPA, 2019) e os dados consolidados do livro "*Recovery of Materials and Energy from Urban Wastes*" referenciado por Themelis et al. (2019). Foram levantados dados do Plano Municipal de Saneamento Básico do município de Ijuí/RS (PLAMSAB, 2018), foram buscados dados quantitativos e qualitativos do ano base de 2021, e determinou-se a composição gravimétrica a partir de amostragem dos RSU do município.

A partir da identificação de tais dados, o presente estudo visou estabelecer um panorama dos impactos ambientais, econômicos e energético dos RSU gerenciados no município de estudo, e teve como objetivo desenvolver cenários visando à aplicação da hierarquia de gestão de resíduos com o aumento da reciclagem, compostagem, produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) e análise da viabilidade para a Recuperação Energética (RE) dos rejeitos da reciclagem como forma alternativa e ambientalmente adequada de destinação dos RSU.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma análise dos aspectos ambientais e econômicos e energéticos do atual programa de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos do município de Ijuí/RS, apresentando novas alternativas ao gerenciamento atual por meio da recuperação energética dos resíduos do município.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Levantar dados de geração de RSU no município de Ijuí/RS.
- 2) Descrever a área de estudo e analisar a composição gravimétrica dos RSU do município de Ijuí/RS;
- 3) Avaliar os impactos ambientais, econômicos e energéticos do atual programa de gestão de RSU do município de Ijuí/RS comparativamente a cenários alternativos de referência por meio de análise usando o *Waste Reduction Model* (WARM).
- 4) Apresentar alternativas ao gerenciamento dos RSU do município de Ijuí/RS, tais como o sistema *Waste-to-Energy*, considerado como possibilidade para amenizar os problemas ambientais provocados pelo aterramento de RSU no município e região.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

É evidente as dificuldades existentes nos municípios brasileiros em relação ao gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos. A quantidade e variedade de resíduos gerados, traz consigo impactos negativos sobre o meio ambiente, se destacando principalmente quanto a sua destinação final. Em sua maioria, as cidades não estão preparadas com locais apropriados para o tratamento dos resíduos e acabam destinando boa parte desse material em aterros e lixões a céu aberto (NOUVION 2020).

Tal prática gera grandes impactos ambientais, podendo-se citar como exemplo o incêndio ocorrido no lixão na cidade de Ijuí, RS em janeiro de 2022, que causou emissões atmosféricas e enorme degradação ambiental como contaminação do solo e águas subterrâneas, poluição atmosférica e entre outros resultados prejudiciais à saúde de todos os seus munícipes.

Conforme Nouvion (2020), “a prestação dos serviços de limpeza urbana e saneamento é essencial para a proteção do meio ambiente e da saúde humana, e não pode ser interrompida, mesmo durante processos epidêmicos”. O atual desenvolvimento econômico e crescimento populacional têm promovido crescente aumento na taxa de geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em todo mundo, e sua gestão tornou-se desafiadora em termos sociais, econômicos e ambientais. Estima-se que até 2025 a quantidade de RSU produzida no mundo aumente para 2,2 bilhões de toneladas por ano (INFIESTA et al., 2019). Segundo estudo realizado pelo *International Solid Waste Association* (ISWA), o Brasil gasta aproximadamente R\$1,5 bilhão por ano no tratamento de doenças de pessoas que tiveram contato inadequado com RSU, ou seja, R\$10 bilhões em 10 anos.

Um estudo de Moraes, Protásio e Ventura (2021) fez a análise da gestão de resíduos sólidos durante a pandemia do covid-19 em países da América do Sul, onde mostra que o cenário causado pela pandemia acentuou as deficiências no setor de RSU, como hábitos de reciclagem pouco estruturados e baixo percentual de recuperação dos resíduos recicláveis, principalmente nos primeiros meses, com restrições sobre algumas atividades humanas.

Os principais pontos levantados em relação ao impacto da pandemia são na mudança da quantidade e composição dos resíduos sólidos, mudança na frequência da coleta e preocupação quanto à segurança e risco de infecção por trabalhadores dessa área.

Em março de 2020, quando se deu o início da pandemia do covid-19, a ABRELPE apontou um aumento da produção de Resíduos Domiciliares (RDO) entre 15-25% (SANTOS et. al., 2022). Em razão da expansão agressiva, governos não tiveram tempo para se adaptar à nova situação emergencial, deixando lacunas institucionais e estruturais no setor de RSU (ARDUSSO et al., 2021).

Dessa forma, novos meios de tratamento de RSU devem ser um aliado nesse contexto, trazendo uma melhor destinação e eliminação de materiais potencialmente prejudiciais à saúde humana e que atualmente são vetores de diversas doenças a nível nacional.

A Gestão Sustentável Integrada de Resíduos (GSIR) é uma parte integral do desenvolvimento sustentável e tem se tornado cada vez mais importante na agenda dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pelas Organizações das Nações Unidas (ONU). Ao tratar sobre o gerenciamento de RSU, é relevante esclarecer inicialmente os conceitos de resíduos e de gerenciamento.

Segundo a NBR nº 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), é possível retirar a definição de resíduos sólidos como "aqueles resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades da comunidade de origem; industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição".

Consideram-se também resíduos sólidos os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como, determinados líquidos cujas particularidades tornem inviáveis seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções tecnicamente e economicamente viáveis em face a melhor tecnologia disponível. De acordo com a NBR nº 10.004, os resíduos podem ser divididos em 03 (três) grupos segundo o seu potencial de dano a saúde e ao meio ambiente, são eles:

- **Resíduos Classe I (perigosos):** são resíduos que apresentam risco à saúde pública ou ao meio ambiente, cujas características inerentes detêm propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

- **Resíduos Classe II A (não perigosos e não inertes):** são resíduos que não detêm as propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, contudo, apresentam a propriedade de solubilidade em água (acima dos padrões estabelecidos pela norma da ABNT), existindo a possibilidade de haver reação com o meio ambiente, e, conseqüentemente, risco de poluição;
- **Classe II B (não perigoso e inerte):** aqueles que não tem constituinte algum solubilizado em concentração superior ao padrão de potabilidade da água.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei Federal nº 12.305/2010) define o gerenciamento de resíduos sólidos como um “conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (artigo 3º, inciso X). Dentre os instrumentos da Lei nº 12.305/2010, tem-se o Plano Municipal de Gerenciamento Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), cuja elaboração é de responsabilidade dos municípios.

O PMGIRS é um instrumento de planejamento estratégico municipal que contempla as diretrizes e ações para o manejo ambientalmente adequado e sustentável dos resíduos, assim como as diretrizes e ações de educação ambiental e mobilização social (BRASIL, 2010). A PNRS, identifica a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, e remete que seja feita de maneira a garantir a maior reintegração dos resíduos no sistema produtivo, promovendo a ordem de prioridades de não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

Essa ordem de prioridade é vista no Relatório da Comissão Europeia “*The role of Waste-to-Energy in the circular economy*”, divulgado em 2017 em Bruxelas, como essencial, e aponta alternativas para a destinação final. Segundo o relatório, a hierarquia de gestão de resíduos é elemento vital da política e legislação da União Europeia quanto aos resíduos e uma chave para a transição para a economia circular.

Seu objetivo principal é estabelecer uma ordem de prioridade que minimize os efeitos ambientais adversos e otimize a eficiência dos recursos na prevenção e gerenciamento de resíduos (COMISSÃO EUROPEIA, 2017). O relatório defende ainda, que há influência da hierarquia de resíduos do ponto de vista climático, em que o descarte em aterros, é geralmente a opção menos favorável para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Por outro lado, a prevenção, reutilização

e reciclagem de resíduos têm o maior potencial para reduzir as emissões de GEE” (COMISSÃO EUROPEIA, 2017). A Figura 1 apresenta a hierarquia de gestão de resíduos e a ordem de prioridade para o seu tratamento.

Figura 1 - Hierarquia de gestão de resíduos



Fonte: Adaptado de Tisi (2019).

Pode-se observar que a prevenção e redução de resíduos deverá constituir a primeira prioridade da gestão de resíduos, a reutilização, reciclagem e compostagem dos materiais, deverão ter prioridade em relação à valorização energética dos resíduos. Essas são etapas necessárias para que somente o rejeito seja utilizado na etapa de Tratamento Térmico em sistemas WtE.

Estima-se que destinar 35% dos RSU para usinas de recuperação energética seria interessante para o Brasil, e que até 2031 sejam necessários R\$11,6 bilhões/ano em investimentos em infraestrutura para garantir a universalidade da gestão sustentável de resíduos sólidos no país, nas atividades de reciclagem, biodigestão, tratamento térmico de RSU, usinas de co-processamento para fabricação de cimento com composto de derivado de resíduos (CDR), pirólise de pneus e outros materiais

sintéticos, entre outras tecnologias de recuperação energética de resíduos (VIEIRA, 2019).

Ao observar mais uma vez os 17 ODS, dentre eles, assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis está o ODS número 12. Encontra-se, portanto, a meta de alcançar o manejo ambientalmente sustentável de todos os resíduos até 2025, e até 2030 reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso.

A escolha das tecnologias de tratamento desempenha um papel relevante no atendimento dos diversos critérios da Gestão dos RSU, sendo determinante em grande parte para o sucesso ou o fracasso do respectivo sistema de gestão. Não existe uma tecnologia de tratamento de resíduos que se encaixe perfeitamente em todas as áreas e em todos os tipos de resíduos. Devendo ser realizado um estudo apurado da geração de resíduos e dos materiais que os compõem e o seu poder calorífico (TISI, 2019).

3.2. GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A geração de resíduos sólidos é a consequência inevitável de todos os processos em que os materiais são utilizados, desde a extração de matérias-primas, fabricação de produtos e consumo. Está relacionada à urbanização, ao comércio, a geração de resíduos são impulsionados pelo aumento da disponibilidade de energia e em segundo lugar o crescimento populacional. A taxa de uso de materiais hoje é tão grande, que os resíduos gerados impactam na qualidade ambiental e na saúde humana se não forem gerenciados adequadamente (THEMELIS et al., 2019).

No Brasil, em dados apurados pela ABRELPE durante o ano de 2020, foram gerados aproximadamente 82,5 milhões de toneladas de resíduos, representando uma geração *per capita* de resíduos de 1,07 kg de resíduos por habitante e apresentando um acréscimo de 4% em relação ao ano anterior (ABRELPE, 2021).

Uma possível razão para esse aumento expressivo foram as novas dinâmicas sociais causada pela pandemia de COVID-19 que, em boa parte, foram quase que totalmente transferidas para as residências, visto que o consumo em restaurantes foi substituído pelo *delivery* e os demais descartes diários de resíduos passaram a acontecer nas residências (ABRELPE, 2021).

A geração de resíduos domiciliares e de limpeza urbana possui relação direta com o local onde se desenvolvem atividades humanas, tendo em vista que o descarte de resíduos é resultado direto do processo de aquisição e consumo de bens e produtos das mais diversas características. Outro fator de influência geral é o desenvolvimento econômico, ou seja, a taxa de produção e consumo de bens, que, conseqüentemente, se reflete na geração de resíduos (LAGERKVIST; DAHLÉN, 2008).

A média de geração de RSU *per capita* no RS foi de 0,79 kg/habitante.dia entre os 401 municípios que responderam os questionários do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (BRASIL, 2019).

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A composição de resíduos é um termo amplamente utilizado para denominar as ações realizadas para conhecer as propriedades intrínsecas de um resíduo e como essas propriedades afetam o ambiente onde o material se encontra e como o ambiente afeta o material (LAGERKVIST; DAHLÉN, 2008).

A classificação de resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem. Segundo a norma NBR nº 10.004/2004, a classificação dos resíduos sólidos se dá quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente em dois grupos - perigosos e não perigosos, sendo ainda esse último grupo subdividido em não inerte e inerte. A categoria de resíduos sólidos urbanos é composta predominantemente por resíduos domésticos.

Outros resíduos sob responsabilidade municipal são, por exemplo, varreduras de ruas, resíduos de instituições públicas, lixo coletado em lixeiras públicas e resíduos verdes de manutenção de parques públicos. Além disso, o sistema de gestão de resíduos municipal geralmente cuida dos resíduos de pequenas empresas e estabelecimentos comerciais. A taxa de geração e a composição dos resíduos dependem de muitos fatores relacionados ao estilo de vida e comportamento (LAGERKVIST; DAHLÉN, 2012).

Um fator de influência geral é o desenvolvimento econômico, e a sazonalidade em locais turísticos, ou seja, a taxa de produção e consumo de bens que, conseqüentemente, se reflete na geração de resíduos. A quantidade coletada e a composição do rejeito doméstico também podem ser afetadas pelo seu manuseio, por

exemplo, o uso de compostagem doméstica e coleta seletiva de recicláveis, onde o fluxo de material é redistribuído, mas a geração total de resíduos é inalterada.

Caracterização de resíduos é um termo amplamente utilizado para denominar as ações realizadas para determinar as propriedades intrínsecas de um resíduo e analisar como essas propriedades afetam o ambiente onde o material se encontra, e como o ambiente afeta o material (LAGERKVIST; DAHLÉN, 2012).

Dependendo da necessidade de informação, a caracterização pode incluir uma ampla gama de análises, por exemplo, testes físicos, químicos ou biológicos, testes para elucidar a degradabilidade, toxicidade, compressibilidade, e para determinar o poder calorífico dos materiais.

Soares (2011) utilizou a caracterização dos RSU segundo a definição da ABNT em sua norma NBR nº 10.004/2004, considerando os seguintes critérios: quantidade de resíduo recebido (t/dia); classe do resíduo; origem do resíduo; tipo de fornecimento e; estimativa da homogeneidade dos resíduos. O total de material obtido após quarteamento foi de cerca de 100 kg de RSU, de onde fez-se novamente o espalhamento para ser separado nas seguintes frações: papel e papelão; plástico duro; plástico macio; matéria orgânica (restos de alimentos e folhas de vegetais); borracha; couro; isopor; madeira; trapos; metais; vidro; fraldas; espuma; outros (SOARES, 2011). Depois de se ter os materiais separados, esses foram pesados e posteriormente passaram por um processo de secagem para determinação da umidade livre. A etapa final foi a moagem para redução do tamanho médio de partícula de cada fração do material inicial e a homogeneização para obtenção de uma mistura característica.

De um modo geral, os RSU são compostos por materiais degradáveis, como papel, papelão, restos de comida, e por materiais não derivados de biomassa, como plásticos, vidro, metais e eletrodomésticos (SOMORIN; ADESOLA; KOLAWOLE, 2017). A nível global, a fração orgânica constitui a maior parcela dos RSU, seguida por papel, plástico, vidro e metal.

A composição gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil, segundo relatório da ABRELPE (2020), é baseada em mais de 186 cidades brasileiras, com uma categorização mínima em orgânicos, metal, vidro, plástico, papel, papelão e rejeitos, estando disposta na Tabela 1.

Fração de RSU	Percentual
Matéria Orgânica	45,3%
Têxteis, couros e borracha	5,6%
Metais	2,3%
Vidro	2,7%
Plástico	16,8%
Papel e papelão	10,4%
Embalagens multicamadas	1,4%
Rejeitos	14,1%
Outros	1,4%
Total	100%

Fonte: adaptado de Abrelpe (2020).

Com o intuito de aproximar-se da realidade do objeto deste estudo, cabe destacar as características do Estado do Rio Grande do Sul, que tem como capital a cidade de Porto Alegre, conta com 497 municípios e uma população que corresponde a 5,6% do total da população brasileira, de aproximadamente 11 milhões de habitantes (PERS, 2014).

A composição gravimétrica média do RSU desse estado, por faixas populacionais dos municípios gaúchos, foi apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Gravimetria dos RSU no Estado do RS

Faixa Populacional (hab.)	Matéria Orgânica	Material Seco Reciclável	Rejeito
Até 50.000	65%	20%	15%
De 50.001 a 300.000	60%	25%	15%
Mais de 300.000	55%	30%	15%

Fonte: Rio Grande do Sul (2014).

Conforme Fleck e Reichert (2016), a caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos gerados pela população da capital Porto Alegre aponta para um perfil composicional com percentuais aproximados de 61,4% de matéria orgânica facilmente biodegradável, 23,4% de resíduos potencialmente recicláveis e 14,5% de rejeitos.

Os principais fatores que influenciam a origem e formação dos resíduos são o número de habitantes da localidade, a área relativa de produção, a sazonalidade, as condições climáticas, os hábitos, costumes e o nível educacional da população, o poder aquisitivo médio da comunidade, o tempo de coleta, a eficiência da coleta, o tipo de equipamento de coleta, a disciplina e controle dos pontos produtores, e a existência de leis e regulamentações específicas.

Considerando que essas características estão relacionadas com o nível de desenvolvimento socioeconômico, a quantidade e a composição dos resíduos locais podem ser utilizadas como um indicador socioeconômico (CAMPOS, 2014). Países com renda elevada possuem resíduos compostos majoritariamente por materiais recicláveis (como o papel e o plástico), enquanto locais de baixa renda possuem RSU compostos majoritariamente por resíduos orgânicos (HOORNWEG; BHADA-TATA, 2012; LIMA et al., 2018; MAYA et al., 2016; SHONHIWA, 2013).

A composição gravimétrica dos RSU do município de Ijuí/RS para o ano de 2018 foi apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição do RSU do município Ijuí (Revisão do PLANSAB 2018)

Material	Fração
Matéria orgânica e Rejeito	68,26%
Papel/Papelão	8,52%
Plástico	14,20%
Metais	3,49%
Vidros	1,87%
Outros (madeira, borracha, tecido)	3,65%
Total	100%

Fonte: adaptado de Município de Ijuí (2018).

Pode-se observar que a maior geração está nas frações de matéria orgânica e rejeito, que representam juntas aproximadamente 69% do total, indicando a ausência de separação desses materiais. Resíduos de plástico seguem com 14,2% dos materiais recicláveis, seguidos de papel e papelão com 9%. Os metais apresentam uma composição de aproximadamente 3,5%, e os vidros contam com porcentagem de 2% desse material. Outros materiais como madeira, tecido e borracha representam aproximadamente 4% dos materiais. Esses dados são apresentados no plano de saneamento básico do município (MUNICÍPIO DE IJUÍ, 2018), conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização dos resíduos da coleta seletiva em Ijuí

Material	%
Borracha	0,15%
Couro	0,23%
Madeira	1,50%
Ferro	3,80%
Cobre	0,15%

Alumínio	0,24%	Metais 4,73%
Latinha alumínio	0,44%	
Outros materiais	0,10%	
Papel branco	2,94%	Papel 24,96%
Papel misto	6,39%	
Papelão	8,87%	
Papel Jornal	6,76%	
Tecidos/Trapos	2,48%	
Vidro	2,63%	
PET Transparente	3,16%	Plástico 10,98%
PET colorido	2,86%	
Plástico cristal	1,95%	
Plástico PEAD	0,90%	
PP (Pinho)	1,11%	
Poliestireno	1,00%	
Embalagem Tetrapak	1,24%	
Matéria Orgânica	3,15%	M.O. 51,10%
Rejeito	37,95%	
Total	100,00%	

Fonte: MUNICÍPIO DE IJUÍ (2018).

Destaca-se que a parcela de rejeitos considerada neste estudo apresentou valor elevado nessa referência, constituída em cerca de 68% de matéria orgânica, porém, de difícil separação pois se encontrava misturada com pequenos pedaços de papel ou plástico, assim como pequenos pedaços de outros materiais (isopor, alumínio, embalagens longa vida, etc.). Observa-se que a fração de rejeito propriamente dita, formada por materiais que não mais poderiam ser reaproveitados de qualquer maneira, representa 10% do volume total do rejeito considerado neste estudo (MUNICÍPIO DE IJUÍ, 2018).

Conforme observado na Tabela 4, materiais como plástico somam 11% e papel 25% do total, seguido dos metais com aproximadamente 5% e outros. Importante destacar a presença de grande quantidade de matéria orgânica e rejeito na fração de materiais recicláveis, esse valor chega a 51%, representando mais da metade dos materiais. Esse fator evidencia a necessidade de ampliar o programa de coleta seletiva e promover a educação ambiental na população.

O processo de caracterização de RSU é essencial para se determinar sua capacidade de utilização como combustível, por exemplo, em co-combustão¹, sendo necessária a análise das propriedades dos resíduos, dentre elas, do poder calorífico. O conhecimento da composição dos resíduos sólidos permite o adequado planejamento do setor por meio de estratégias, políticas públicas e processos

¹ De acordo com Salema (2008), a co-combustão está associada à combustão de biomassa e carvão para a produção de energia. A co-combustão apresenta vantagens, as quais se destacam a redução de emissões por unidade de energia produzida.

específicos que assegurem a destinação ambientalmente adequada preconizada pela PNRS, levando-se em consideração as melhores alternativas disponíveis e aplicáveis, de acordo com os tipos e quantidades de resíduos existentes (ABRELPE, 2020).

De acordo com Themelis et al. (2019), o poder calorífico médio do RSU é tipicamente 2.388,46 kcal/kg. Umidade e materiais não combustíveis (vidro e metais) reduzem o poder calorífico do RSU, que pode variar de 1.912 kcal/kg a 3.350 kcal/kg, com os maiores valores provenientes de misturas de RSU e resíduos industriais, e os mais baixos para RSU com alto teor de umidade. A maior fração dos resíduos pós-reciclagem (20-40%, em média) são compostos químico-orgânicos de carbono e hidrogênio (combustível), e geralmente acabam em aterros.

A eficiência do processo de recuperação de energia de RSU é fortemente dependente do Poder Calorífico Inferior (PCI) dos materiais, ou seja, a quantidade líquida de energia que pode ser obtida a partir dos resíduos. Alguns dos materiais presentes no RSU apresentam valores acima de 6.000 kcal/kg (Tabela 5), coincidindo com os valores de alguns combustíveis fósseis (EPE, 2018). Dessa forma, é possível estimar o PCI médio dos RSU com base em sua composição gravimétrica.

Tabela 5 - Poder Calorífico Inferior de alguns dos materiais encontrados nos RSU

Material	Poder Calorífico Inferior* (kcal/kg)
Plástico	6.300
Borracha	6.780
Couro	3.630
Têxteis	3.480
Madeira	2.520
Alimentos	1.310
Papel	4.030

*Base úmida

Fonte: adaptado de EPE (2018).

Assumindo a hipótese de PCI médio de 1.7913 kcal/kg, o desempenho elétrico bruto de uma Usina de Recuperação de Energia (URE) de 28%, e a disponibilidade anual de 8.000 horas, segundo estudos de Abren (2020) indicaram um potencial de geração de energia a partir de RSU de 19 TWhe (e 2.358 MW de capacidade instalada) por ano nas 28 regiões metropolitanas do Brasil e 11,8 MW (e 1.469 MW de capacidade instalada) por ano nos 35 municípios com mais de 600 mil habitantes (ABREN, 2020).

Portanto, se os RSU nas 28 regiões metropolitanas e nos 35 municípios do Brasil com mais de 600 mil habitantes fossem convertidos em energia partir do

tratamento térmico, a geração corresponderia a cerca de 5% da geração total nacional, representando uma participação marginal na matriz elétrica brasileira, mas com um gigantesco impacto no setor elétrico e no saneamento brasileiro, que está décadas atrás dos países desenvolvidos (ABREN, 2020).

Sendo assim, desenvolver logística e planejamento (SOMPLAK et al., 2014) e conhecer a composição física e termoquímica dos RSU pós-reciclagem é fundamental no processo de implementação de recuperação energética de resíduos. A recuperação energética de resíduos é aplicada na Europa desde o início do século XX.

Devido à preocupação com a qualidade e a escassez de água e o elevado custo de área terrestre para aterros, o Japão e muitos países europeus desenvolveram grandes projetos de usinas WtE nos anos 60, com rápida transferência de tecnologia para os EUA, sendo amplamente utilizada em diversos países, especialmente em função dos graves problemas dos aterros sanitários (TISI, 2019).

3.4. PROCESSOS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Métodos e tecnologias para lidar com o gerenciamento e a destinação de resíduos sólidos têm sido desenvolvidos. Cidades e países se esforçam para aumentar suas taxas de reciclagem e compostagem tanto quanto possível. Um exemplo de sucesso é a União Europeia, que orientou seus países membros a eliminar gradualmente a disposição em aterro, aumentando suas capacidades de reciclagem e recuperação energética (THEMELIS et al., 2019).

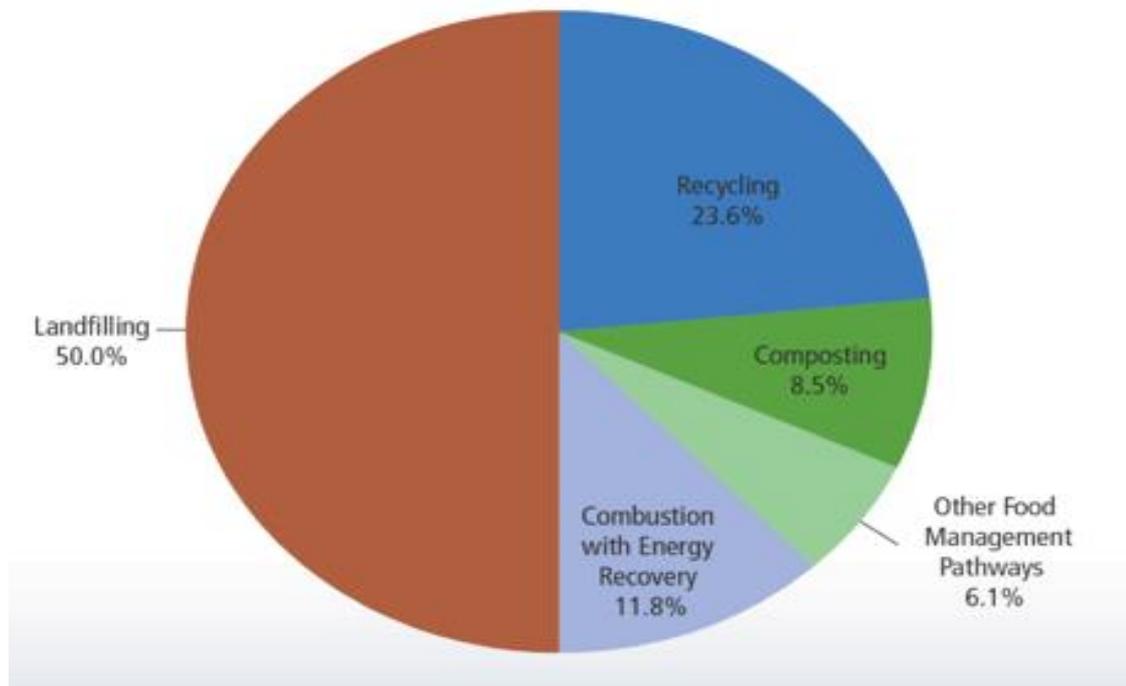
Os progressos realizados entre 1995 e 2018 resultaram na redução da taxa de deposição em aterro europeu de 86% para 15,3%. Isso foi devido ao aumento nas taxas de reciclagem mais compostagem para 46,3% e na taxa de recuperação energética para 28,4% (THEMELIS et al., 2019).

Nos Estados Unidos, foram gerados aproximadamente 292 milhões de toneladas de RSU em 2018. Dos RSU gerados, aproximadamente 69 milhões de toneladas foram recicladas e 25 milhões de toneladas foram compostadas, o equivalente a uma taxa de reciclagem de aproximadamente 24% e de compostagem de 9% (USEPA, 2018).

Além disso, cerca de 18 milhões de toneladas de alimentos (6,1%) foram processados por meio de outras vias de gestão de alimentos. Mais de 34 milhões de

toneladas de RSU foram encaminhados para a recuperação energética de resíduos, o equivalente a aproximadamente 12%. Finalmente, mais de 146 milhões de toneladas (50,0%) foram depositadas em aterros sanitários, conforme mostra a Figura 2 (USEPA, 2018).

Figura 2 - Gestão de RSU nos Estados Unidos em 2018



Fonte: USEPA (2018).

O trabalho desenvolvido por Themelis et al. (2019) apontou as usinas WtE como alternativa aos aterros sanitários, que transformam os resíduos pós-reciclagem da sociedade em energia elétrica, calor e metais recicláveis. Segundo esses autores, esse é um grande exemplo de ecologia industrial porque é uma forma de fechar o ciclo dos materiais, promovendo assim a economia circular. Pode-se classificar o desempenho ambiental da gestão de resíduos analisando a capacidade de recuperação de materiais por meio de reciclagem, compostagem e conversão de energia (ou seja, WtE) com a quantidade de RSU que é depositada em aterro (THEMELIS et al., 2013).

A WtE é incentivada pela legislação Brasileira. A lei 12.305/10, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), prioriza o aproveitamento energético dos resíduos sólidos à disposição final em aterros sanitários. A lei prevê ainda que poderão ser utilizadas tecnologias visando à viabilidade técnica e ambiental e que seja implantado um programa de monitoramento de emissões de gases aprovado pelo

órgão ambiental responsável (BRASIL, 2010). A Portaria Interministerial 274, de 30 de abril de 2019, disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos.

Métodos e tecnologias para lidar com a gestão e destinação final dos resíduos sólidos têm sido desenvolvidos (BING et al., 2016). Uma opção para a fração do RSU, não reciclável é processá-la para se obter um Combustível Derivado de Resíduo (CDR).

Devido à sua heterogeneidade, seu alto teor de umidade e fração de incombustíveis, os resíduos sólidos municipais necessitam de processamento mínimo para serem convertidos termicamente em grande escala (KYPRIANIDIS; SKVARIL, 2016).

De acordo com Chen et al. (2014), as plantas WtE atuais são geralmente caracterizadas por baixa eficiência (variando de 18% a 25% na maioria dos casos), especialmente em comparação com as plantas a vapor convencionais que usam combustíveis fósseis. Vários estudos têm sido feitos sobre a integração de um sistema WtE a outro sistema térmico.

Consonni e Viganò (2012) e Poma, Verda e Consonni (2010) exploraram o projeto híbrido contendo um sistema WtE e um ciclo combinado a gás natural, onde o vapor saturado produzido em uma caldeira WtE é exportado para o gerador de vapor de recuperação de calor de ciclo combinado para ser superaquecido e então alimentado a uma turbina a vapor, servindo tanto o ciclo combinado quanto o sistema WtE.

Para Perrot e Subiantoro (2018), a tecnologia mais madura é a incineração por queima em massa, que pode gerar 400-700 kWh por tonelada de RSU. Turbinas a gás integradas a usinas WtE foram propostas recentemente para aumentar a eficiência energética em mais de 40%. Embora a tecnologia ainda não esteja madura, o sistema integrado é promissor. Um exemplo é a Solução WEG S.A. desenvolvida para geração de energia elétrica a partir da gaseificação de RSU.

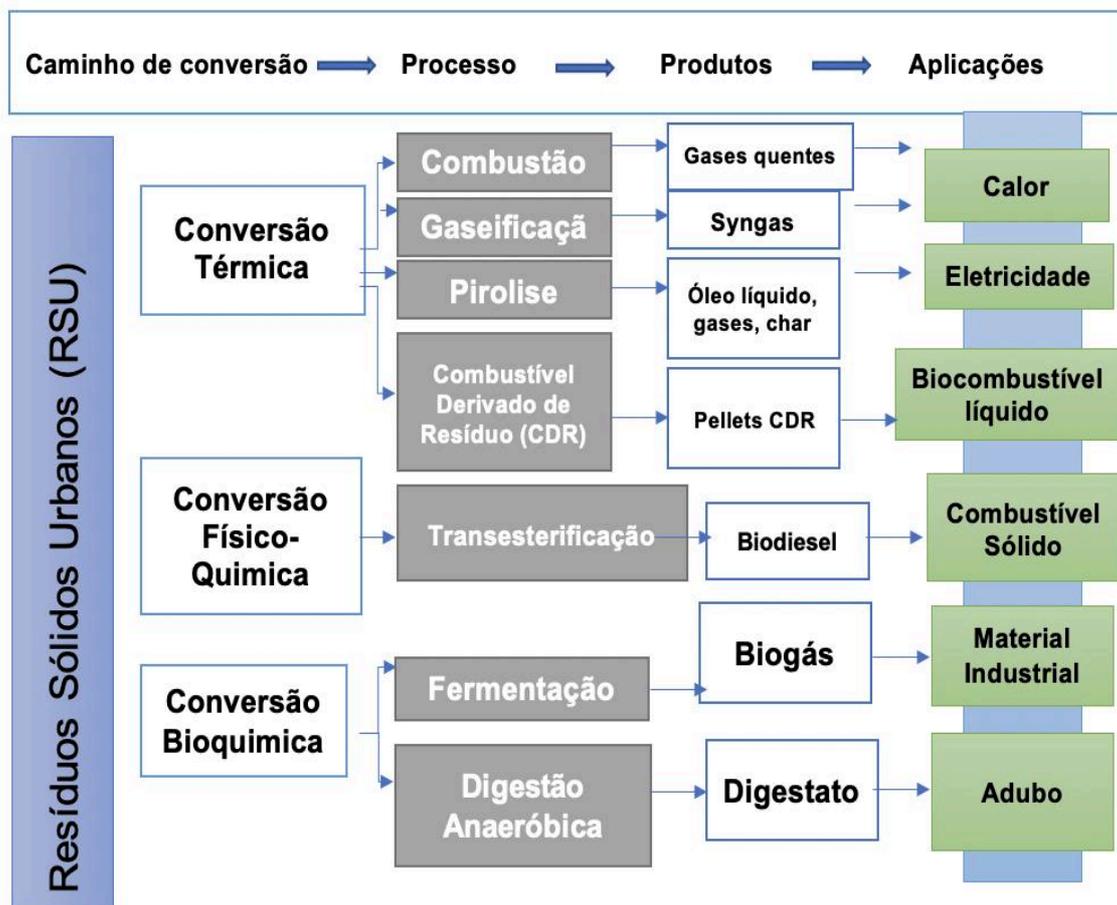
Várias etapas transformam o RSU em gás combustível que, ao ser queimado, gera calor em uma caldeira, e o vapor pode ser usado para acionar uma turbina para produzir eletricidade. O processo permite o aproveitamento total do poder calorífico dos resíduos, reduzindo a geração de passivos ambientais (WEG, 2019).

A recuperação energética em usinas WtE requerem métodos e processos para recuperar parte da energia contida nos RSU (TISI, 2019; BING et al., 2016). A conversão térmica de RSU pode ser dividida em diferentes grupos de processos

termoquímicos (incineração, que opera com excesso de oxigênio; gaseificação e pirólise, que operam com déficit de oxigênio).

Os CDR também são considerados para aplicação em processos de recuperação energética pois possuem alto poder calorífico e configuram uma fonte de energia não convencional e renovável (PILISSÃO et al., 2021; MACHADO, 2022). Tem-se também a conversão físico-química dos resíduos e a conversão bioquímica (digestão anaeróbica e aterro com captura de gás) (THEMELIS et al., 2016; MALINAUSKAITE et al., 2017; CARVALHO et al., 2019). As tecnologias disponíveis podem ser visualizadas detalhadamente na Figura 3.

Figura 3 - Tecnologias de Recuperação Energética de Resíduos



Fonte: Pilissão et al. (2021).

3.5. TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DOS RSU

A escolha da tecnologia mais adequada irá depender de fatores como: a composição dos resíduos, o custo do processo, a localização geográfica das unidades de processamento e da eficiência requerida (NIZAMIA et al., 2015). A incineração é o

método mais maduro, pois já apresenta tecnologia estabelecida e muitas plantas em operação (THEMELIS et al., 2016).

Segundo Chen et al. (2020), as atuais usinas WtE são geralmente caracterizadas por baixa eficiência (variando de 18% a 25% na maioria dos casos), especialmente em comparação com usinas a vapor convencionais usando combustíveis fósseis, e vários estudos têm sido feitos sobre a incorporação de um sistema WtE em outro sistema térmico.

Consonni (2007) e Poma, Verdi e Consonni (2010) exploraram o projeto híbrido contendo um sistema WtE e um ciclo combinado a gás natural, onde o vapor saturado produzido em uma caldeira WtE é exportado para o gerador de vapor de recuperação de calor do ciclo combinado para ser superaquecido e, em seguida, alimentado no vapor turbina servindo tanto ao ciclo combinado quanto ao sistema WtE.

Para Perrot e Subiantoro (2018), a tecnologia mais madura é a incineração *mass-burning*, que pode gerar 400-700 kWh por tonelada de RSU. Usinas integradas de turbinas a gás e WtE foram recentemente propostas para aumentar a eficiência energética em mais de 40%. Embora a tecnologia ainda não esteja madura, o sistema integrado é promissor. Um exemplo é a Solução WEG desenvolvida para a geração de energia elétrica a partir da gaseificação de RSU. Várias etapas transformam RSU em gás combustível que ao ser queimado gera calor em uma caldeira, e o vapor pode ser utilizado no acionamento de uma turbina para produção de energia elétrica. O processo possibilita total aproveitamento do poder calorífico dos resíduos, reduzindo a geração de passivo ambiental (WEG, 2019).

Silva Filho et al. (2019), apresentaram um novo sistema brasileiro em escala piloto que combina os processos de pirólise e combustão, alimentado por mistura de RSU e cavacos de madeira. A co-pirólise² desses sólidos produziu um produto sólido carbonoso (carvão) e uma mistura gasosa usada em uma câmara de pós-combustão para geração de calor. O processo conduzido em etapas separadas de pirólise e combustão minimizou as emissões de cloro, BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno), dioxinas, furanos, SO₂ (dióxido de enxofre) e NO_x (óxidos de nitrogênio, NO e NO₂), que ficaram abaixo dos limites legais em vários países. Isso foi conseguido controlando-se os parâmetros operacionais, como a temperatura da câmara de

² A pirólise de resíduos plásticos com combustível fóssil (carvão ou gásóleo leve), denominada co-pirólise, tem sido muito investigada por apresentar resultados bastante promissores (MISKOLCZI; ANGYAL; BARTHA; VALKAI, 2009).

pirólise e o excesso de ar. Concluiu-se que o processo de pirólise acoplado à pós-combustão pode ser vantajoso, sendo necessária a análise preliminar do combustível.

A partir da pirólise de CDR e biomassa é possível obter hidrocarbonetos com características similares a combustíveis líquidos comerciais como gasolina e diesel (LORA; VENTURINI, 2012), podendo-se ainda gerar coque, combustível com grande demanda no setor industrial brasileiro (ex: siderúrgico e cimenteiro).

3.5.1. Combustão

Os processos termoquímicos convertem resíduos em energia térmica (temperatura elevada) e envolvem uma diversidade de reações químicas homogêneas e heterogêneas (DHAR; KUMAR; KUMAR, 2017). De modo geral, podem ser classificados em: combustão (incineração), gaseificação e pirólise (DHAR; KUMAR; KUMAR, 2017; MAYA et al., 2016; WHITICAR; RALPH, 2011).

O processo de incineração pode ser definido como uma reação de oxidação rápida, entre os resíduos e o ar, em elevadas temperaturas (800-1200 °C), promovendo a combustão completa da matéria orgânica e convertendo o material não combustível em matéria inorgânica estável (cinzas) (MAYA et al., 2016; WU; LIN; ZENG, 2014). Assim, essa tecnologia transforma, por combustão, a energia química (presente nos resíduos) em calor. O calor, por sua vez, pode ser convertido em eletricidade em motores térmicos (BROWN; BROWN, 2014; BRUNNER; RECHBERGER, 2015).

O processo de incineração, além de gerar energia, é capaz de reduzir significativamente a quantidade de RSU destinados aos aterros sanitários, diminuindo, assim, a quantidade de áreas adequadas necessárias para a disposição desses resíduos (LI et al., 2015; SONG; SUN; JIN, 2017). O resíduo remanescente do processo de incineração consiste em matéria mineral amplamente conhecida como cinzas de fundo e cinzas volantes (KOWALSKI; KASINA; MICHALIK, 2016; YAKUBU et al., 2018).

Essas cinzas, após serem removidas da câmara de combustão principal, são arrefecidas e podem ser manuseadas em estado seco ou úmido e serem utilizadas como fertilizantes agrícolas, misturas para concreto e na indústria siderúrgica (BROWN, 2011; TSAKALOU et al., 2018). Por outro lado, as cinzas volantes podem ser classificadas como resíduo tóxico devido ao alto teor de metais pesados e alta

concentração de dioxinas (XIONG et al., 2014). Assim, essas cinzas, geralmente, são tratadas em fase seca separadamente das cinzas de fundo proveniente da câmara de combustão (YAKUBU et al., 2018).

A incineração gera emissões de poluentes atmosféricos tóxicos que incluem: cinzas, fuligem, CO, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio [principalmente óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂)], óxidos de enxofre (SO_x, principalmente, o SO₂) e alguns gases ácidos (por exemplo, HCl) (BROWN, 2011; KOWALSKI; KASINA; MICHALIK, 2016; ZHANG; TAN; GERSBERG, 2010). Essas emissões, se não controladas, podem provocar impactos ambientais.

Atualmente, tecnologias avançadas são utilizadas nas plantas de incineração de resíduos com o objetivo de reduzir e tratar as emissões para tornar o processo o mais seguro possível (LINO; ISMAIL, 2017; OUDA; RAZA, 2014). O alto custo dessas tecnologias de proteção ambiental, que podem representar de 40% a 70% do custo total do projeto, juntamente com outros fatores, como ruído, odores e emissões fugitivas (por exemplo, poeira e detritos) são os fatores limitantes à expansão da técnica para muitas regiões (BROWN, 2011; OUDA; RAZA, 2014).

3.5.2. Gaseificação e Pirólise

As tecnologias de gaseificação e pirólise não são novas, mas ainda há poucas plantas comercialmente instaladas em todo o mundo para tratar RSU (KUMAR; SAMADDER, 2017; SHI et al., 2016). A gaseificação consiste em um processo de conversão térmica de materiais sólidos em um produto gasoso rico energeticamente, conhecido como gás de síntese (PANDEY et al., 2016; SHEHZAD; BASHIR; SETHUPATHI, 2016).

Durante o processo de gaseificação, o carbono presente na matéria-prima reage com uma quantidade limitada de um agente oxidante (O₂ puro, ar, vapor de água ou mistura desses) para produzir gás de síntese, matéria mineral (cinzas), alcatrões e outros compostos voláteis (BASSYOUNI et al., 2014; BURRA; GUPTA, 2018; LOPES et al., 2018; WILLIAMS, 2005).

Durante o processo de gaseificação nota-se a ocorrência de quatro estágios sequenciais: secagem, pirólise, oxidação (combustão) e redução (SANSANIWAL et al., 2017; SRIVASTAVA, 2013). No entanto, para ocorrência de todas essas etapas, o gaseificador deve ser construído com subdivisões que tenham áreas de troca

térmica (seja por convecção ou radiação) que permitam que as reações de secagem e pirólise ocorram (LOPES et al., 2018).

Inicialmente, os resíduos podem passar por um processo de secagem utilizando parte do calor proveniente do gaseificador (MARTIN et al., 2010; SANSANIWAL et al., 2017). A secagem acontece em temperaturas entre 25 °C e 110 °C onde ocorre a eliminação da H₂O (água) (BROWN, 2011; LOPES et al., 2018). Em seguida ocorre a pirólise, na ausência de oxigênio, em temperaturas entre 110 °C e 550 °C, com ápice do processo na faixa entre 400-500 °C (BROWN, 2011; SANSANIWAL et al., 2017).

O terceiro estágio do processo é a combustão, no qual uma fração do agente oxidante será consumida para gerar calor para a fase endotérmica da gaseificação (MARTIN et al., 2010; SANSANIWAL et al., 2017; SRIVASTAVA, 2013). Além disso, por tratar-se de reações exotérmicas, a temperatura do meio aumenta consideravelmente e varia entre 800 °C e 1200 °C (MARTIN et al., 2010; SANSANIWAL et al., 2017).

Nessa faixa, os resíduos reagem com o O₂ para produção de CO₂ (gás carbônico) e outros produtos. Por fim, ocorre a etapa de redução, caracterizada pela formação dos componentes combustíveis do gás de síntese na ausência de O₂ (MARTIN et al., 2010). Assim, os gases quentes provenientes das etapas anteriores são reduzidos, produzindo CO, H₂ (hidrogênio) e CH₄ (metano) (SANSANIWAL et al., 2017).

A pirólise, por sua vez, consiste na decomposição termoquímica dos resíduos na ausência de O₂ em temperaturas elevadas (entre 300 °C e 800 °C) (ANSAH; WANG; SHAHBAZI, 2016; BROWN, 2011; CZAJCZYŃSKA et al., 2017; DAS; TIWARI, 2018; MOYA et al., 2017). O processo pode resultar na formação de um resíduo sólido rico em carbono (carvão), um líquido semelhante a um óleo (bio-óleo) e uma mistura de gases (gás de síntese) que são fontes alternativas de energia (ANSAH; WANG; SHAHBAZI, 2016; BALAT et al., 2009; TRIPATHY; PANIGRAHI; PANIGRAHI, 2016).

3.5.3. Digestão Anaeróbica

Os processos de conversão bioquímica normalmente são preferidos para os resíduos com alta porcentagem de matéria orgânica biodegradável e alto teor de

umidade (KUMAR; SAMADDER, 2017; MATSAKAS et al., 2017). Esses processos utilizam microrganismos diversos e enzimas para decompor os resíduos em substâncias mais simples (BEYENE; WERKNEH; AMBAYE, 2018).

Com isso, as principais opções tecnológicas para recuperação de energia por processos bioquímicos são: a digestão anaeróbia (DA) e os aterros sanitários com recuperação de biogás (DHAR; KUMAR; KUMAR, 2017; KUMAR; SAMADDER, 2017). O processo de degradação dos resíduos é semelhante entre os dois processos. A diferença é que o processo de DA ocorre em um reator fechado, com parâmetros de processo controlados e otimizados para a produção de biogás, enquanto nos aterros tal processo ocorre de forma natural e, conseqüentemente, em um tempo mais longo (TANIGAWA, 2017; WILLIAMS, 2005).

A digestão anaeróbia é processo microbiano complexo que envolve uma série de reações metabólicas para a quebra da matéria orgânica em biogás e fertilizante orgânico, conforme Kumar e Samadder (2020). Ainda de acordo com os autores, em países desenvolvidos, a digestão anaeróbica é uma forma de tratamento da fração orgânica dos RSU. Este processo de WtE é utilizado no tratamento de diferentes tipos de resíduos orgânicos como RSU, esgotos e lodos ativados, resíduos agroindustriais, efluentes da pecuária, entre outros (BAREDAR et al., 2016; DA ROS et al., 2017).

A aplicação desse processo no tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos tem aumentado, principalmente, devido à introdução da coleta seletiva e da instalação de plantas de separação mecânica dos resíduos alimentares (APPELS et al., 2011; DONG; ZHENHONG; YONGMING, 2010).

A fração orgânica dos RSU é constituída em grande parte por restos de comida, portanto, possui alto teor de umidade, alta biodegradabilidade e conteúdo de nutrientes podendo ser facilmente empregada no processo de DA (MAO et al., 2015; ZHANG; LEE; JAHNG, 2011).

Tal fração é uma rica biodiversidade de microrganismos, o que acelera a degradação da matéria orgânica biodegradável. Esse processo resulta numa valiosa mistura de gases de alto valor energético, chamada biogás. O biogás é constituído de 55-70% em volume de CH₄, 30-45% de CO₂ e traços de outros gases, como H₂S (ácido sulfídrico), H₂ e N₂ (nitrogênio) (APPELS et al., 2011; KUMAR; SAMADDER, 2017; LI; PARK; ZHU, 2011; ZHANG et al., 2018).

Além da produção de biogás, o processo de DA resulta na produção de digestato (sólido ou líquido dependo do substrato utilizado), o qual necessita de

tratamento (TANIGAWA, 2017; XIN; MA; LIU, 2018). No entanto, estudos têm demonstrado que, dependendo das características do digestato, o mesmo pode ser utilizado como fertilizante ou condicionador de solo, pois normalmente apresenta composição rica em nutrientes (FITAMO et al., 2016; LEIVA; KOUPAIE; ESKICIOGLU, 2014; MOODY et al., 2009; PELLERA; GIDARAKOS, 2017).

O biogás produzido consiste em fonte de energia renovável e contínua, podendo ser utilizado na geração de calor e eletricidade ou, ainda, como combustível para veículos (DHAR; KUMAR; KUMAR, 2017; LEIVA; KOUPAIE; ESKICIOGLU, 2014; MAO et al., 2015). O biogás produzido normalmente é utilizado em instalações que geram simultaneamente calor e eletricidade, com eficiência elétrica de, aproximadamente, 33% e térmica de 45% (APPELS et al., 2011). Seguindo essas vantagens, a Comissão Europeia recomendou a conversão de biogás em biometano para melhorar a eficiência energética da digestão anaeróbia (KUMAR; SAMADDER, 2020).

Neste sentido, o RSU também tem enorme potencial para a produção de biogás, biometano e hidrogênio. Segundo Abiogás (2019), estima-se que o potencial de produção de biogás no Brasil seja de 82 bilhões de Nm³/ano, sendo 41 bilhões no setor suco energético (cana-de-açúcar e seus derivados como bagaço, palha, filtro e vinhaça), 37 bilhões do setor agrícola (proteína animal, dejetos animais e culturas de milho, mandioca e soja) e 3 bilhões do setor de saneamento ambiental (esgoto sanitário e RSU).

Assim, a escolha dos sistemas tecnológicos que melhor se adaptam a cada região deve levar em consideração diversos aspectos sociais, ambientais e econômicos. A análise da composição é extremamente importante para determinar a viabilidade do uso da energia.

3.5.4 Produção de Combustível Derivado de Resíduo

Os CDR de RSU e/ou biomassa compactado configuram uma fonte de energia não convencional e renovável. Isso poderia ser utilizado como ferramenta para reduzir parcialmente a dependência de combustíveis fósseis (como carvão mineral) e fornecer um caminho alternativo de reutilização para tais materiais (MACHADO, 2022).

As emissões (dioxinas, furanos, mercúrio, cádmio, chumbo, ácido clorídrico, dióxido de enxofre e partículas) referentes à queima de combustíveis alternativos

derivados de resíduos sólidos em testes realizados nos EUA foram menores do que as instalações de combustíveis fósseis (GUG; CACCIOLA; SOBKOWICZ, 2015).

Os CDR podem ser conformados em péletes ou briquetes, o que representa vantagens em relação ao material não processado, como maior densidade energética, maior regularidade térmica (facilita a operação de sistemas de conversão), facilidade de logística de transporte e armazenamento (menores custos pela maior massa de combustível por unidade de volume), combustível mais limpo e homogêneo (composição regular e uniforme, o que favorece maior eficiência de combustão). Essas características potencializam a participação inovadora do combustível derivado de RSU e biomassa como combustível alternativo e parcialmente renovável para o setor energético e industrial (MACHADO, 2022).

A combinação de biomassa e resíduos de alto valor calorífico oferece dois benefícios importantes: por um lado, a maximização do uso das fontes de energia e, por outro, uma solução potencial para o descarte de resíduos plásticos (GARRIDO et al., 2017). Estudos de Gug, Cacciola e Sobkowicz (2015) apontam que os péletes obtidos a partir das matérias-primas derivadas de RSU e biomassa são altamente densos e com teor de umidade muito baixo (<10%), o que permite alta eficiência de conversão de energia (cerca de 75%).

Uma vez produzidos, os CDR podem ter muitas utilizações. Os principais estudos tratam da sua utilização em (KYPRIANIDIS E SKVARIL, 2016):

- Produção de eletricidade: Isolada ou combinada com carvão ou gás natural em usinas termelétricas;
- Conteúdo energético em processos industriais, como por exemplo, fornos de cimento e alto-forno;
- Constituição de novos materiais, como por exemplo, na produção de asfalto ou materiais de construção.

O CDR misto de RSU e biomassa pode ser usado muito bem em muitas aplicações específicas, como fornos de cimento, usinas de cogeração e usinas de energia (EDO, 2016). Tal uso resulta em aplicações mais eficientes do poder calorífico dos resíduos e uma redução significativa do CO₂ emitido devido à substituição parcial de combustíveis fósseis, como carvão e lenhito (MACHADO, 2022).

Durante os estudos de co-combustão, as proporções de cada um dos combustíveis são expressas em termos de fração mássica ou fração energética (também chamada térmica). O uso desse tipo de combustível, no entanto, requer um

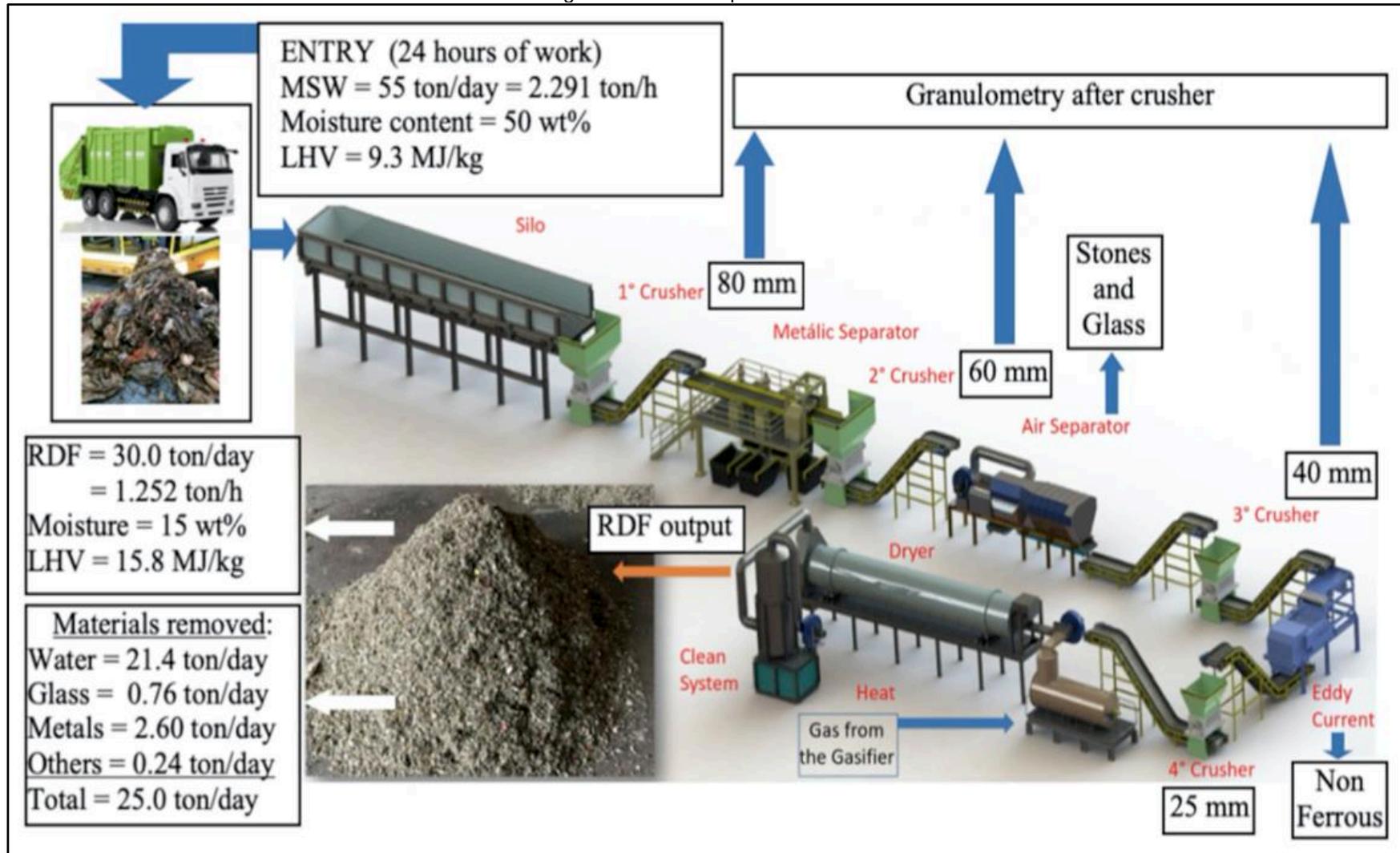
fornecimento estável de resíduos pré-tratados e homogeneizados, com uma qualidade de combustível que possa ser comercializada entre produtores e usuários. Como regra geral, o CDR não deve ser utilizado se a energia térmica produzida na combustão for menor do que a energia utilizada para processar o combustível (deve haver um ganho energético) (ZKG, 2014).

A produção e aplicação energética do combustível derivado de RSU e biomassa pode reduzir volume e despesas das administrações municipais com disposição de resíduos em aterros sanitários, otimizando a operação desses que, na maioria, tem como única receita aquela oriunda da disposição de RSU (PILISSÃO et al., 2021).

Passarão assim, da condição de simples depositários de RSU bruto para unidades processadoras para obtenção de combustível compactado derivado de RSU (péletes ou briquetes) e produtos derivados dado que esse poderá ser diretamente comercializado ou convertido em sistema térmico instalado no local em que for produzido (PILISSÃO et al., 2021).

Resultados obtidos por Infiesta et al. (2019) demonstram o desenvolvimento de uma linha industrial para processamento de resíduos sólidos com capacidade de processamento de 55 toneladas/dia de RSU para produzir 30 toneladas/dia de CDR com poder calorífico de até 14,6 MJ/kg. O CDR produzido pode ser usado como biocombustível em uma usina de gaseificação sem o uso de outro tipo de combustível fóssil (BING et al., 2016; CARVALHO et al., 2019; INFUESTA et al., 2019), conforme Figura 4.

Figura 4 - Linha de processamento de CDR



Fonte: Adaptado de Infiesta et al. (2019)

Diversos processos estão sendo implementados para produzir CDR a partir de RSU. Esses processos geralmente consistem em triagem e separação mecânica dos resíduos, redução de tamanho (trituração, picagem e moagem), separação e peneiramento, mistura, bem como secagem e densificação. Todas essas etapas são utilizadas para aumentar a homogeneidade e o poder calorífico do CDR final, melhorando suas características para manuseio, transporte, armazenamento e alimentação no sistema de conversão utilizando-se as operações unitárias para combustíveis tradicionais (PILISSÃO et al., 2021).

Tisi (2019) relatou que nos EUA haviam 12 plantas WtE de CDR, variando em capacidade de 360-2.700 t/dia, e no total processavam aproximadamente seis milhões de toneladas métricas de RSU anualmente (ou seja, 20% da capacidade WtE dos EUA). Uma variação do processo CDR é também utilizado na União Europeia (EU), onde o processo de Tratamento Mecânico Biológico (TMB) trata RSU misturado e produz CDR que é queimado com carvão em plantas termelétricas e de cimento, que precisam ser equipadas com sistemas de controle de poluição atmosférica com mesma performance daqueles das plantas WtE (TISI, 2019).

3.5.5. Tratamento Mecânico Biológico (TMB)

O TMB ou MTB (*Mechanical Biological Treatment*, em inglês) é uma variação do processo formador do CDR desenvolvido na Europa. Como discutido antes, o RSU contém restos de comida e podas de jardim que variam de aproximadamente 25% em nações desenvolvidas a 50-55%, ou mais, nos países em desenvolvimento. Esses materiais orgânicos naturais contêm muita umidade e a remoção de parte dela aumenta o poder calorífico dos resíduos sólidos parcialmente secos (THEMELIS, 2016).

O MBT começou a ser utilizado para tratar resíduo sólido após o processo de reciclagem na fonte. Inicialmente, foi desenvolvido para reduzir a quantidade de resíduos destinados aos aterros mas, atualmente, as tecnologias MBT são vistas também como plantas de recuperação de CDR e de materiais, combinando tecnologias de tratamento mecânico (telas, grades, ímãs etc.) com tecnologias biológicas (compostagem e digestão anaeróbica) (THEMELIS, 2016).

Também se utiliza o MBT para recuperação da fração orgânica dos RSU. É um sistema de segregação, uma vez que são recebidos resíduos mistos de diferentes fontes de geração. Tem como objetivo separar o RSU misto em três frações sólidas: (i) materiais recicláveis, (ii) orgânicos naturais que são compostados (aeróbica e anaerobicamente) e (iii) um resíduo combustível denominado SRF (*Solid Recovered Fuels*), ou CDR. (EDO et al., 2016).

Em 2006 a capacidade de MBT havia crescido para aproximadamente cinco milhões de toneladas de SRF, principalmente na Alemanha e alguns países europeus. Há vários tipos de processos MBT. Primeiramente, o resíduo é triturado e separado num vaso cilíndrico rotativo (peneira rotativa) em uma fração orgânica fina que é encaminhado para a compostagem, uma fração maior é mecanicamente separada entre materiais recicláveis (metais, alguns tipos de papel, de plástico etc.) por fim é formado o CDR (THEMELIS et al., 2016).

Na variante “BMT” do processo MBT, ocorre a separação mecânica depois que o RSU triturado é submetido a “biosecagem” por meio de um fluxo de ar através do leito de sólidos triturados. Durante as várias operações do processo MBT, grande parte da umidade é retirada e uma parte dos orgânicos sofre reação ao estado de dióxido de carbono (compostagem ou biosecagem) ou metano (digestão anaeróbica) (THEMELIS et al., 2016).

Promover práticas mais sustentáveis no gerenciamento de RSU incentivará expansão da cobertura da rede coleta e tratamento no país e poderá tornar a operação mais viável em termos técnicos, econômicos e ambientais, contribuindo assim para tornar o saneamento básico mais sustentável. Ao se desenvolver tratamentos alternativos ao aterramento de RSU, integrados aos demais níveis da hierarquia de gestão de resíduos sólidos (reduzir, reutilizar, reciclar, recuperar), benefícios nas esferas social, econômica e ambiental são obtidos

3.6. ESCOLHA DAS MELHORES ALTERNATIVAS DE GERENCIAMENTO

Uma etapa importante do processo de gestão de RSU é a escolha da tecnologia. A seleção de soluções corretas de gestão de RSU deve considerar e avaliar critérios técnicos, ambientais, econômicos, políticos e sociais (ABDEL-SHAFY; MANSOUR, 2018).

Todos os produtos e materiais introduzidos na sociedade acabam em algum lugar. Assim, o pensamento do ciclo de vida é uma base importante para a análise de sistemas de gestão de resíduos (THEMELIS et al., 2019). Embora os critérios técnicos, ambientais e econômicos sejam os parâmetros mais importantes, muitas vezes, questões políticas e sociais influenciam na escolha e, por isso, precisam ser consideradas nesse processo. O Quadro 1 identifica tais critérios:

Quadro 1 - Critérios para a escolha de tecnologia para gerenciamento de RSU

Critério	Descrição
Técnicos	Características quantitativas e qualitativas dos resíduos gerados, geografia da região, geomorfologia, pluviometria, urbanização, distância do centro gerador e aspectos urbanísticos.
Ambientais	Disponibilidade de área adequada, emissões de gases, geração de líquidos e outros que devem atender às legislações específicas.
Econômicos	Capacidade financeira de investimentos e capacidade de operação e manutenção das tecnologias.
Políticos	De fundamental importância no Brasil, em função da descontinuidade administrativa após a mudança periódica de gestão, que tem trazido cenário negativos na consolidação de tecnologias de tratamento de resíduos, tornando-se uma das maiores antipolíticas públicas existentes no país.
Sociais	Geração de emprego e renda e sua relação com a tecnologia a ser utilizada.

Fonte: adaptado de Abdel-Shafy; Mansour (2018).

Uma grande dificuldade na escolha de tecnologias de gestão é encontrar dados precisos em relação a composição dos RSU, tal ação é de fundamental importância para auxiliar na tomada de decisões. Critérios técnicos incluem parâmetros quantitativos e qualitativos dos resíduos, por isso, características como, poder calorífico e teor de umidade devem ser conhecidas tanto para o planejamento e avaliação ambiental da gestão de resíduos, quanto na decisão sobre a utilidade na produção de energia (ABDEL-SHAFY; MANSOUR, 2018; CAMPOS, 2014).

A gestão destes resíduos é realizada a partir de algumas categorias (parâmetros), conforme demonstrado no Quadro 2.

Quadro 2 - Parâmetros de avaliação para a gestão dos RSU

Parâmetros	Descrição	Importância
Taxa de geração por habitante (kg/habitante.dia)	Quantidade de lixo gerado por habitante num período específico; refere-se aos volumes efetivamente coletados e à população atendida.	Fundamental para o planejamento de todo o sistema de gerenciamento do lixo, principalmente no dimensionamento de instalações e equipamentos.
Composição física	Refere-se às porcentagens das várias frações do lixo, tais como papel, papelão, madeira, trapo, couro, plástico duro, plástico mole, matéria orgânica, metal ferroso, metal não-ferroso, vidro, borracha e outros.	Ponto de partida para estudos de aproveitamento das diversas frações e para a compostagem.
Densidade aparente	Relação entre massa e volume do lixo.	Determina a capacidade volumétrica dos meios de coleta, transporte, tratamento e disposição final.
Umidade	Quantidade de água contida na massa do lixo.	Influência e escolha da tecnologia de tratamento e equipamentos de coleta. Tem influência notável sobre o poder calorífico, densidade e velocidade de decomposição biológica da massa de lixo.
Teor de materiais combustíveis e incombustíveis	Quantidade de materiais que se prestam a incineração e de materiais inertes.	Juntamente com a umidade, informa, de maneira aproximada, sobre as propriedades de combustível dos resíduos.
Poder calorífico	É a quantidade de calor gerada pela combustão de 1 kg de lixo misto (e não somente dos materiais facilmente combustíveis).	Avaliação para instalações de incineração.
Composição química	Normalmente são analisados N, P, K, S, C, relação C/N, pH e sólidos voláteis.	Definição da forma mais adequada de tratamento (sobretudo compostagem) e disposição final.
Teor de matéria orgânica	Quantidade de matéria orgânica contida no lixo. Inclui matéria orgânica não putrescível (papel, papelão etc.) e putrescível (verduras, alimentos, etc.).	Avaliação da utilização do processo de compostagem. Avaliação do estágio de estabilização do lixo aterrado.
Potencial bioquímico de metano (PBM)	Quantidade de metano que pode ser potencialmente produzida sob condições anaeróbias.	Avaliação da biodegradabilidade dos resíduos.

Fonte: Engelmann (2021, p.62).

Cidades na União Europeia consideraram que a sua sustentabilidade também se baseia na recuperação de energia de resíduos. São equipadas com instalações de tratamento de resíduos para tratar uma parte significativa dos materiais, a fim de produzir energia na forma de calor e eletricidade.

E fazem isso de uma maneira muito bem-sucedida e ecológica, pois utilizam principalmente as frações de resíduos que não podem ser recicladas ou reutilizadas,

e não depositam esses recursos em aterro (THEMELIS et al., 2016). Em suma, um planejamento de gestão de resíduos deve atender os seguintes critérios básicos:

- Fornecer um serviço robusto e customizado de todo o resíduo com o mínimo de esforço para o cliente e o cidadão;
- Buscar o menor impacto ambiental possível em termos de ruído e contaminação do ar, água e solo;
- Implementar o máximo de recuperação de recursos dos resíduos, mas também minimizar o uso de recursos para o manuseio desses resíduos;
- Prover uma ocupação segura e saudável para os trabalhadores envolvidos na gestão dos resíduos;
- Buscar mitigar o impacto no tráfego urbano na coleta dos resíduos, na emissão de gases dos veículos, ruído, acidentes de trânsito e derramamento de líquido dos resíduos (chorume);
- Implementar projetos estéticos e arquitetônicos para a construção de plantas de coleta e tratamento de resíduos;
- Respeitar as leis vigentes, regulamentos e códigos de conduta de boas práticas.

Uma atenção ao modo de gerenciamento de resíduos e materiais é fundamental para minimizar os impactos ambientais, incluindo a mudança climática global. Afastar-se do atual modelo linear de extração de material por meio da fabricação, uso e descarte para um modelo de economia mais circular, onde os materiais são cada vez mais devolvidos a produtos úteis, pode ajudar a reduzir o consumo de energia significativo e os impactos ambientais de resíduos e gerenciamento de materiais.

3.7. HIERARQUIA DE GESTÃO DE RESÍDUOS

A Hierarquia de Gestão de Resíduos é elemento vital da política e legislação da União Europeia e uma chave para a transição para a economia circular. Seu objetivo principal é estabelecer uma ordem de prioridade que minimize os efeitos ambientais adversos e otimize a eficiência dos recursos na prevenção e gerenciamento de resíduos (COMISSÃO EUROPEIA, 2017).

A redução da geração de RSU está no topo da hierarquia e, até certo ponto, pode ser alcançada pela “engenharia verde” de produtos e embalagens. No entanto,

a geração de resíduos depende do consumo e do padrão de vida de cada comunidade. Por esse motivo não pode ser controlado pela agência de gestão de resíduos de um município. Os meios disponíveis para gerenciar os resíduos gerados podem ser divididos em duas grandes categorias:

- Recicláveis, que inclui a reutilização de alguns produtos, recuperação de materiais como (metais, papel, plásticos e vidro), digestão anaeróbia e compostagem aeróbia de orgânicos biogênicos, como alimentos e “resíduos de quintal” (grama, folhas, galhos);
- Resíduos pós-reciclagem, que são aqueles que permanecem após todas as possíveis etapas de reciclagem.

Ao longo dos anos, as principais formas de descarte dos resíduos pós-reciclagem foram enterrá-los ou queimá-los em depósitos não regulamentados. Com o aumento do volume de RSU gerado, os lixões das regiões desenvolvidas foram sendo convertidos em aterros sanitários para regularizar a destinação e amenizar impactos ambientais negativos. Esses receberam revestimentos impermeáveis, que permitiram a coleta e tratamento de efluentes líquidos, e sistemas de coleta de gás de aterro, que reduziram substancialmente a quantidade de metano que escapava para a atmosfera (TISI, 2019; THEMELIS, 2019).

Dessa forma, a redução de resíduos deve ser prioridade na gestão de resíduos, onde reutilização, reciclagem e compostagem de materiais devem ter prioridade nas formas de tratamento dos RSU. Essas etapas são necessárias para que apenas os resíduos chamados rejeitos sejam utilizados na etapa de tratamento térmico em sistemas WtE.

Nos últimos anos, engenheiros e cientistas desenvolveram uma alternativa aos aterros sanitários: as usinas de transformação de resíduos em energia alimentadas por resíduos sólidos e podem ser construídas dentro ou perto das cidades. Essas usinas transformam os resíduos pós-reciclagem da sociedade em eletricidade, calor e metais recicláveis.

A hierarquia de gestão de resíduos fornece importantes orientações sobre como priorizar o uso de alternativas de gerenciamento de resíduos. O seu principal objetivo é promover a redução da produção de resíduos, otimizar o uso de materiais e melhorar a destinação dos rejeitos, o que também é objeto da chamada Economia Circular (THEMELIS, 2019).

O conceito de economia circular pode ser descrito como aquele em que os produtos e os materiais são altamente valorizados, diferente do modelo econômico linear tradicional, que se baseia no padrão de "fazer, consumir e jogar fora". Na prática a economia circular, baseia-se em dois ciclos, um para materiais orgânicos e outro para materiais inorgânicos, o objetivo é limitar o máximo possível o desperdício, ao buscar que os produtos tenham uma vida útil maior (COMISSÃO EUROPEIA, 2017).

As medidas que conduzem a uma economia circular incluem a reutilização, reparo, reforma e reciclagem de materiais e produtos existentes. A hierarquia de gestão de resíduos tem justamente o propósito de estabelecer uma ordem de prioridade para minimizar os efeitos ambientais adversos e otimizar a eficiência dos recursos (TISI, 2019).

A escolha das tecnologias de tratamento desempenha um papel importante no cumprimento dos diversos critérios de gestão de RSU, sendo em grande medida determinante para o sucesso ou fracasso do respectivo sistema de gestão. Não existe uma tecnologia de tratamento de resíduos que se encaixe perfeitamente em todas as áreas e para todos os tipos de resíduos. Deve ser realizado um estudo preciso sobre os materiais que compõem o resíduo e de seu poder calorífico caso a caso (TISI, 2019).

3.8. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia de avaliação multidisciplinar para garantir que as implicações de longo prazo em toda a cadeia de valor sejam consideradas ao selecionar uma opção. Há uma variedade de ferramentas de ACV disponíveis internacionalmente, projetadas especificamente para aplicações de gerenciamento de resíduos e materiais (THEMELIS et al., 2013).

Ferramentas para ACV permitem a criação de cenários nos quais os fluxos de materiais e energia são avaliados em todos os processos de gestão de resíduos. Apesar de a ACV avaliar o sistema completo de gestão de RSU, trata-se de uma técnica complexa, intensiva em tempo e recursos, além de difícil aplicação para a maioria dos gestores (DEUS; BEZERRA; BATTISTELLE, 2019; MAHMOUDKHANI; VALIZADEH; KHASTOO, 2014).

Pesquisadores brasileiros também estão utilizando ferramentas para obter dados e avaliar diferentes cenários (DEUS et al., 2020; SOUZA et al., 2019). No

trabalho desenvolvido por Souza et al. (2019), o *software* WARM foi utilizado para analisar emissões de GEE e uso de energia em diferentes cenários hipotéticos para a gestão de RSU na cidade de Varginha (MG). Os resultados apontaram um maior benefício ambiental a partir do cenário relacionado à recuperação de materiais recicláveis, incineração dos RSU e digestão anaeróbia. Ainda, o aproveitamento energético com potência gerada de 150 kW foi o único verificado como viável economicamente.

Deus et al. (2020) utilizaram a ferramenta para identificar práticas centrais de gestão que possam ser implementadas para melhorar a gestão do RSU, especialmente para municípios pequenos, e para obter dados utilizados na criação de um indicador agregado para medir o impacto ambiental dos RSU em pequenos municípios do estado de São Paulo. O estudo apontou as atividades de reciclagem e integração com coletores de materiais como fundamentais, tanto para a inclusão social quanto para a existência de indicadores favoráveis à gestão de RSU.

3.8.1. Modelo de Redução de Resíduos - Warm

A Agência Americana de Proteção Ambiental (USEPA) possui ferramentas disponíveis para uso público, uma delas é o *Waste Reduction Model* (WARM), Modelo de Redução de Resíduos, é uma ferramenta que estima a economia de energia e os impactos econômicos de práticas de gerenciamento de resíduos e alternativas, incluindo redução de resíduos na fonte, reciclagem, combustão, compostagem, digestão anaeróbica e aterros sanitários, oferece uma análise mais abrangente dos impactos ambientais, um conjunto completo de opções de relatórios e entradas personalizáveis para avaliação das opções do sistema de gerenciamento de resíduos.

O modelo foi projetado para comparar estratégias de gerenciamento de resíduos com abordagens de alternativas diferentes (EPA, 2020). O sistema permite a inserção de dados em planilhas específicas no *Microsoft Excel*. A partir da inserção de dados em planilha específica, o sistema do WARM calcula as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) associadas a uma variedade de componentes de materiais e resíduos (papel, alumínio, plástico, etc.), expressas em toneladas de dióxido de carbono equivalente - tCO₂ e toneladas de carbono equivalente - tC_e, energia (milhões de unidades térmicas britânicas – BTU, *British Thermal Unit*, em inglês) e impactos econômicos (horas de trabalho, salários e taxas em dólar americano - US\$) para

diferentes práticas de gerenciamento de resíduos e alternativas, incluindo redução da geração de resíduos na fonte, reciclagem, combustão, compostagem, biodigestão e aterramento (USEPA, 2020).

O WARM aceita como entrada do usuário as quantidades de cada tipo de resíduos e uma alternativa de gerenciamento desses. Neste estudo, as quantidades de resíduos em cada cenário de gestão de resíduos foram calculadas com base em dados levantados no momento da pesquisa.

Esse modelo tem sido amplamente aplicado em muitas cidades diferentes ao redor do mundo (GREENE; TONJES, 2014; LAI et; al., 2014; MAHMOUDKHANI et al., 2014; VERGARA et al., 2011).

O WARM está atualmente disponível como uma ferramenta baseada em um banco de dados desenvolvido em software de ACV *openLCA*. Também está disponível como uma planilha do *Microsoft Excel* para download. O WARM pode ser usado por indivíduos e organizações desde governos estaduais e locais, estudantes, pequenas empresas e outras organizações interessadas em GEE, energia e impactos econômicos das decisões de gerenciamento de materiais. O usuário pode construir vários cenários simplesmente inserindo dados sobre a quantidade de resíduos manuseados por tipo de material e por prática de gestão (USEPA, 2020).

3.9. SÍNTESE DO REFERENCIAL TEÓRICO

O Quadro 3 demonstra a síntese dos materiais utilizados para a elaboração do referencial teórico, indicando autoria e principais informações que serviram de embasamento deste trabalho.

Quadro 3 - Síntese do referencial teórico utilizado

Autor (es) / País / Ano	Gestão	Matéria Prima	Aspectos ambientais	Ganhos Energéticos	Tecnologia utilizada
Lagerkvist e Dahlén Nova Iorque, 2012	RSU	Resíduos Sólidos	Geração e Caracterização e Gestão ambiental de RSU	Caracterização de RSU	Gravimetria
LAI, K. et al. Canadá, 2014	WARM	Impactos ambientais, econômicos e sociais	Proposta de cenário alternativo	Processo de Hierarquia Analítica de Saaty (AHP)	WARM
THEMELIS, N. J. et al. EUA, 2016	RSU	Hierarquia de gestão	Reduz as emissões atmosféricas	14.31 MJ/kg ¹ - 29.14 MJ/kg	WTE
MALINAUSKAITE J. et al. União Europeia, 2017	Economia circular	RSU	Minimizar o desperdício	Valor calorífico médio dos RSU (10 MJ/kg)	Incineração
LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Brasil, 2017	GRSU	RSU	Recicláveis a R\$1120,00	Geração de eletricidade para 1% e 39% das residências de Campinas	Biodigestor e a incineração
COM. Belgica, 2017	RSU	Hierarquia de Gestão de RSU	Substitui o sistema de deposição de resíduos em aterro	Energia	WTE
PERROT, J.-F.; SUBIANTORO, A. Nova Zelândia, 2018	WtE	RSU	Poluição do ar; eficiência energética	30,8 <i>petajoules</i> anuais na Nova Zelândia	Incineração, DA, gaseificação e pirólise.
DAI-PRA, L. B. et al. Brasil, 2018	ACV	Rejeito de RSU	Aumento da vida útil do aterro	Redução de emissões	Processos de triagem, reciclagem e compostagem
ANASSTASIA, T. T. et al. Indonésia, 2018	CDR	<i>Software OpenLCA Ecoinvent</i>	Potencial de aquecimento global	Fonte de energia	CDR
OLIVEIRA, A. L. A. R. Brasil, 2019	RSU	ACV	Aquecimento global, toxicidade acidificação, eutrofização	Alternativas de tratamento no gerenciamento dos RSU	Aterro
TISI, Y. S. A. B. Brasil, 2019	RSU	Recuperação energética de RSU	Gestão integrada e sustentável de RSU	Fonte alternativa de energia	Desenvolvimento de tecnologia nacional
Themelis e Bourtsalas 2019	Hierarquia de RSU	RSU, RCC, RSS, RSI	Redução de emissões de GEE	Recuperação de Materiais e Energia dos Resíduos Urbanos	WtE
DEUS, et al. 2019	Impactos Ambientais	RSU	Indicadores Ambientais	Avaliação e identificação das melhores práticas de gestão	WTE
ENGELMANN, P. M. 2021	Gestão de RSU	RSU	Potencial Energético	Aproveitamento energético dos RSU da cidade de Xangri-lá	WtE, Digestão Anaeróbica

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4. METODOLOGIA

O presente trabalho consistiu no estudo de caso do sistema de gestão dos RSU do município de Ijuí/RS, Brasil. Após a revisão bibliográfica, a metodologia desta pesquisa foi desenvolvida em cinco principais passos.

A primeira etapa consistiu na definição e na descrição do objeto de estudo - o município de Ijuí/RS, seguido da análise do seu modelo de gerenciamento de RSU. Para tanto, detalhou-se os processos de coleta, transporte e destinação final de RSU.

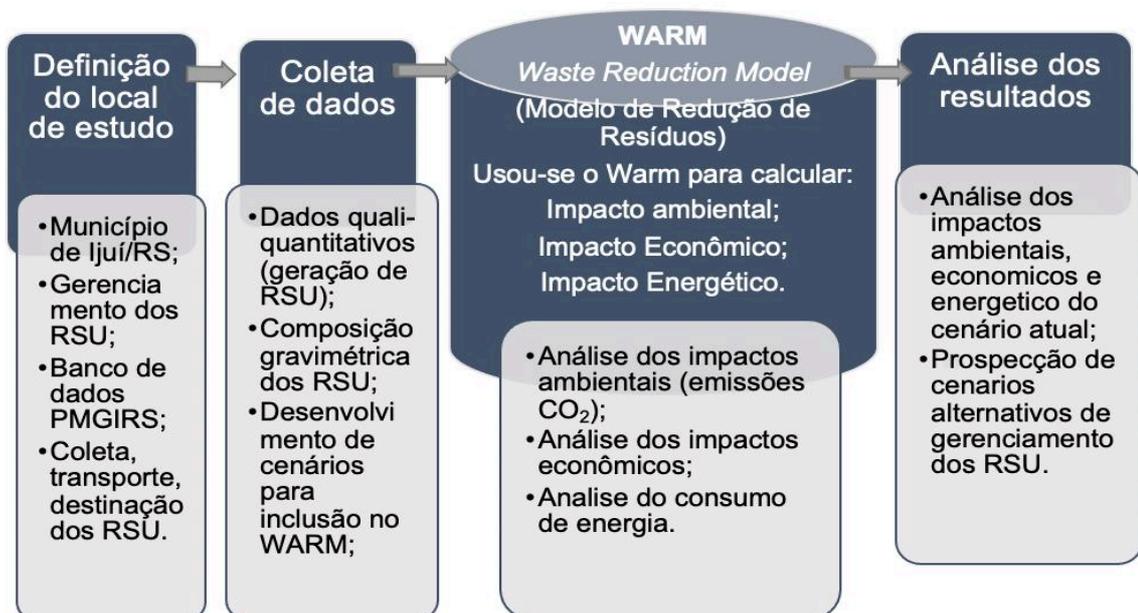
Na segunda etapa realizou-se a coleta de dados quali-quantitativos, de dados de geração e de composição gravimétrica dos RSU do município.

Na terceira etapa descreveu-se o cenário atual dos RSU. Ademais, prospectou-se cenários alternativos com foco na redução do índice de aterramento, no aumento da reciclagem, na inserção da compostagem e na recuperação energética por meio de combustão em sistemas térmicos.

Na quarta etapa deste trabalho empregou-se a ferramenta WARM para a análise do cenário base e dos cenários alternativos a partir dos dados coletados.

Por fim, na quinta etapa foi realizada a análise dos dados coletados e a apresentação dos resultados deste estudo. As etapas metodológicas foram representadas no fluxograma ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma das etapas da pesquisa

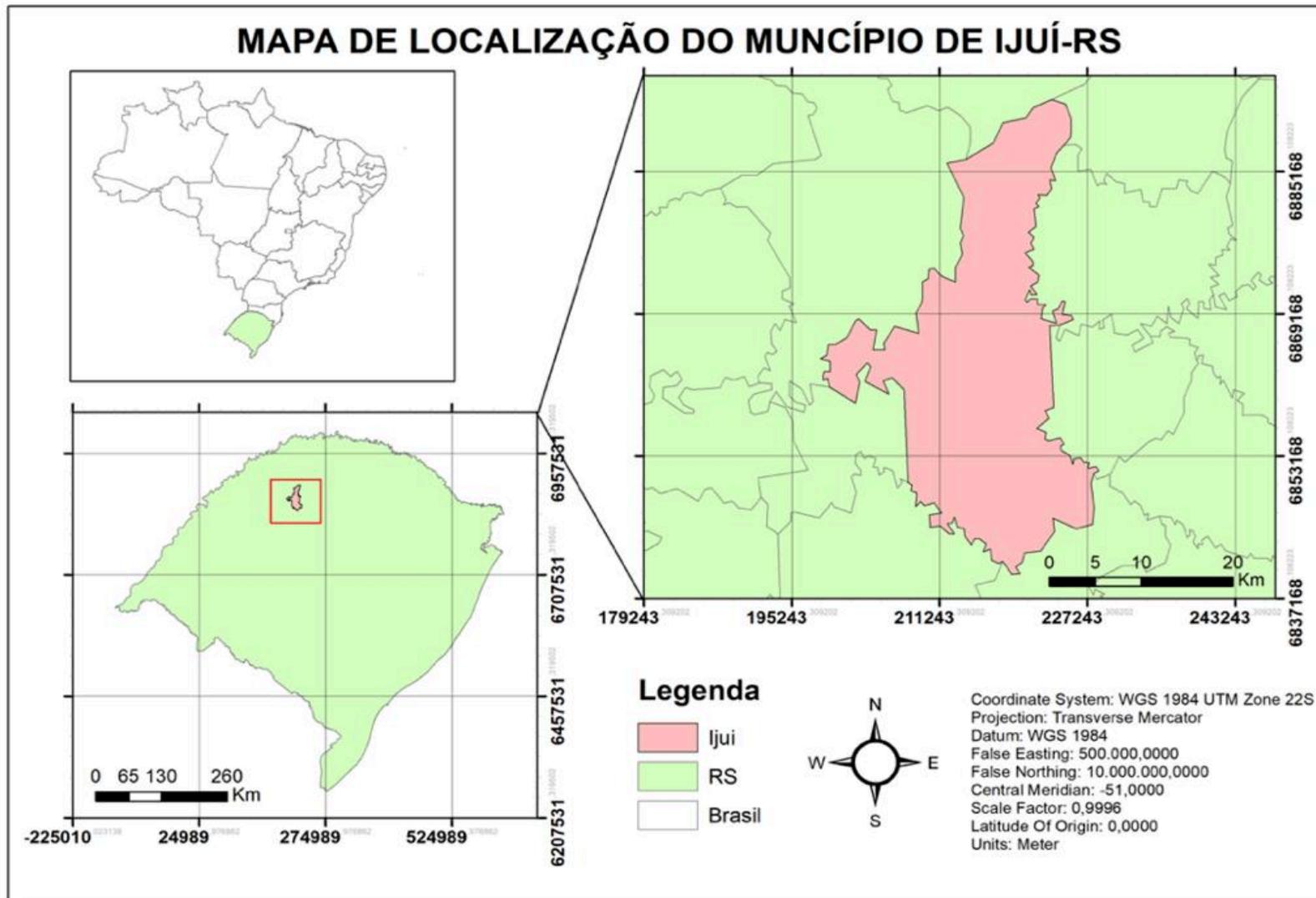


Fonte: Adaptado de Deus et al. (2020).

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

O objeto deste estudo é o município de Ijuí/RS, situado na região noroeste do RS, nas coordenadas $53^{\circ} 54' 50''$ W e $28^{\circ} 23' 17''$ S. O município está localizado (Figura 6) a uma distância de 385 km de Porto Alegre, capital do estado. Ijuí apresenta uma área geográfica de 689 km^2 , correspondendo a $22,15 \text{ km}^2$ de área urbanizada, e conta com uma população total de aproximadamente 84 mil habitantes segundo estimativa de 2020 (IBGE, 2021).

Figura 6 - Localização de Ijuí/RS



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.2. PANORAMA DA GESTÃO DE RSU EM IJUÍ/RS

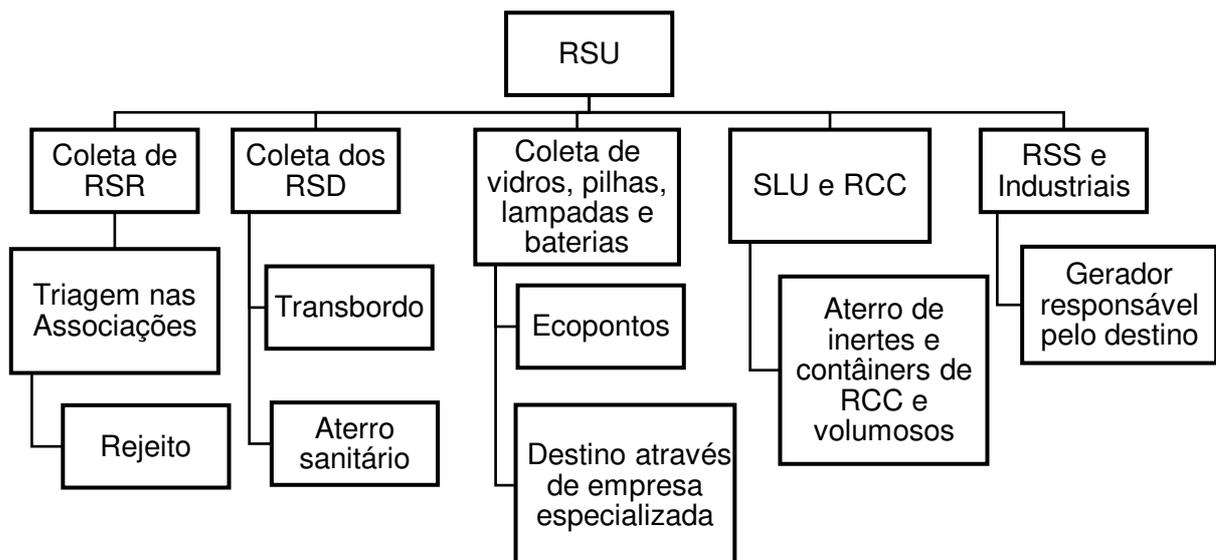
O gerenciamento dos RSU no município de Ijuí/RS é realizado pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMMA), órgão responsável pela contratação de empresas, por meio de licitação, para a prestação dos serviços de coleta, transporte, operação do serviço de transbordo, transferência e destinação final dos RSU no município.

O município dispõe de serviços englobando varrição, coletas, tratamento e disposição de resíduos de diferentes origens, assim segmentados:

- Resíduos Sólidos Domiciliares – RSD;
- Resíduos Secos e Recicláveis – RSR;
- Serviço de Limpeza Urbana - SLU (varrição, poda e supressão de árvores, mutirões de limpeza);
- Resíduos da Construção Civil - RCC;
- Resíduos de Serviços de Saúde - RSS;
- Resíduos eletrônicos como pilhas, lâmpadas e baterias.

O fluxograma apresentado na Figura 7 apresenta as etapas de gestão de RSU em Ijuí/RS (MUNICÍPIO DE IJUÍ, 2018).

Figura 7 - Plano de gestão integrada de resíduos sólidos, Ijuí/RS



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A gestão dos RSU gerados no município de Ijuí conta com coleta seletiva dos RSR. Os materiais recicláveis são coletados e encaminhados para as associações para a triagem e separação dos materiais. Os RSD são encaminhados para a estação de transbordo municipal e após para a destinação final em aterro sanitário. Resíduos como vidro, pilhas, lâmpadas e baterias contam com ecopontos e são destinados através de empresas especializadas. Atualmente os resíduos volumosos e RCC provenientes do SLU são destinados por meio de containers contratados para resíduos Classe I e volumosos. Os RSS e industriais são destinados pelo próprio gerador. Os serviços principais foram descritos nos tópicos a seguir.

4.2.1. Resíduos sólidos domiciliares e resíduos secos recicláveis

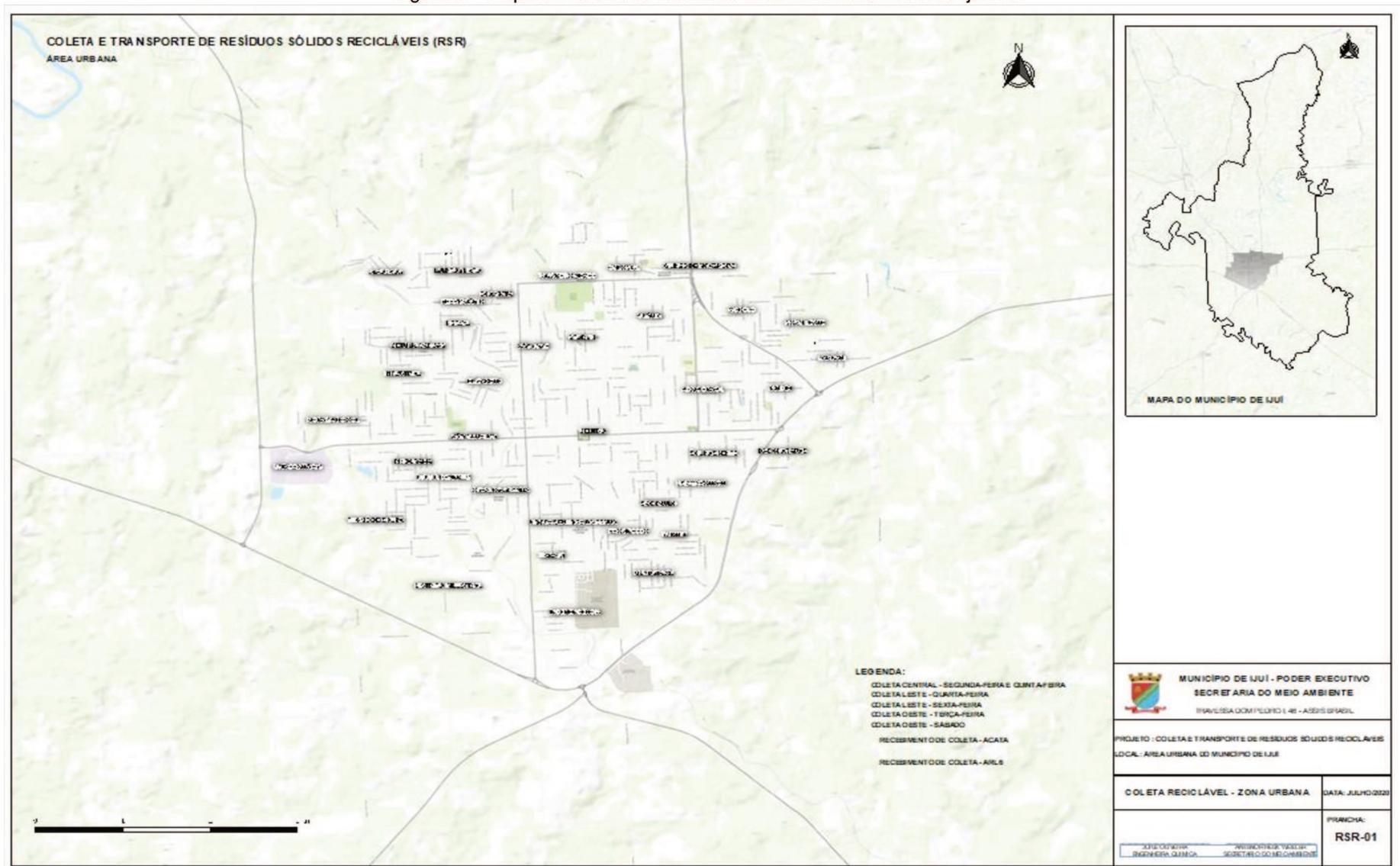
O município possui dois tipos de serviços de coleta dos resíduos urbanos: RSD e RSR. O sistema de coleta dos RSD é realizado dentro dos limites do perímetro urbano do município, nos seus distritos e nas localidades rurais, cobrindo praticamente 100% da área do município, de acordo com a Secretaria Municipal do Meio Ambiente.

A frota de veículos utilizada é específica para cada categoria de resíduos, sendo que para os resíduos orgânicos e os rejeitos, utiliza-se quatro caminhões compactadores com capacidade de 5 m³ cada que operam executando jornada de trabalho de 20 horas/dia, havendo mais um caminhão de reserva operacional, totalizando cinco caminhões.

O sistema de coleta de RSR é realizada dentro do perímetro urbano e localidades da zona rural. Os resíduos coletados são transportados até as associações de recicladores de materiais. Para a coleta seletiva são utilizados dois caminhões baús e a sua contratação é feita por quilômetro rodado.

Toda a logística, e a frequência de coleta, é planejada e distribuída por setores que compreendem grupos de bairros. O mapa da logística de coleta e transporte dos RSR na área urbana e suas divisões pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8 - Mapa da coleta de RSR nas áreas urbana e rural de Ijuí/RS



Fonte: Município de Ijuí (2020).

Segundo informações obtidas na revisão do Plansab (MUNICÍPIO DE IJUÍ, 2018) o município possui 111 ecopontos na zona urbana e 9 ecopontos na zona rural do município. Esses ecopontos consistem em coletores fixos nos quais a comunidade pode depositar vidros e pilhas descartadas. A coleta nesses locais ocorre semanalmente ou conforme a demanda.

A gestão da coleta é de responsabilidade da SMMA, e os vidros são coletados e transportados até o transbordo municipal para, posteriormente, serem encaminhados para a destinação final por empresa especializada. O sistema de coleta dos RSU do município é operado com 32 coletadores e 10 motoristas, totalizando 42 pessoas. Atualmente o índice de coleta da zona urbana inclui aproximadamente 26.560 residências, o que representa 97% das residências no município (MUNICÍPIO DE IJUÍ, 2018).

Por meio de projeto de educação ambiental, o município desenvolveu o *WebApp* "Ijuí Lixo Zero", o qual reúne informações sobre o sistema de coleta de resíduos de Ijuí/RS. O aplicativo fornece informações sobre o cronograma de coleta, recebe informações e dicas sobre a separação dos resíduos, além de consultar os ecopontos localizados no município, a Figura 9 apresenta a interface do aplicativo.

Figura 9 – Aplicativo Ijuí Lixo Zero



Fonte: MUNICÍPIO DE IJUÍ (s.d.).

4.2.2. Associações de recicladores

O município conta com duas associações de recicladores de materiais operando formalmente há aproximadamente 15 anos: Associação de Catadoras de Materiais Recicláveis de Ijuí (ACATA) e Associação de Recicladores da Linha 6 Leste (ARL6).

Atualmente, as associações contam em média com 22 associados cada uma, trabalhando diretamente com a separação e comércio dos materiais recicláveis, e o município conta com 2 servidores de carreira que fazem a gestão dos contratos de prestação de serviço e 2 servidores de serviços gerais que trabalham na estação de transbordo do município (SMMA, 2021).

As sedes das associações são locais cedidas pelo município para a operação do sistema de triagem dos RSR. Atualmente dois galpões fazem parte do sistema de gestão de RSU. A ACATA fica localizada na Rua Afrânio Peixoto, 294, Bairro Luiz Fogliatto, e é composta majoritariamente por mulheres. A associação passou recentemente por reformas de sua infraestrutura para melhorar as condições de trabalho de seus colaboradores. A prefeitura investiu aproximadamente R\$ 320.000,00 na ampliação dos galpões de triagem das associações do município (SMMA, 2021).

Já a ARL6 está localizada no Acesso à Linha 6 Leste, S/N, Ijuí/RS, e é operada por núcleo familiar que anteriormente trabalhava e vivia no lixão municipal. A gestão das duas associações é realizada por seus associados e despesas como água, luz, são de responsabilidade dos colaboradores. A Figura 10 apresenta imagens dessas associações.

Figura 10 - Sede da Associação de Catadoras de Materiais Recicláveis (ACATA) e Associação de Recicladores da Linha 6 (ARL)



Fonte: Fotografadas pelo autor (2022).

4.2.3. Resíduos de serviço de saúde, industriais, eletrônicos e da construção civil

Os RSS gerados nas 29 unidades básicas de saúde presentes no município são coletados por empresa contratada e, atualmente, são encaminhados para tratamento em processamento de autoclave na cidade de Triunfo/RS.

Os resíduos industriais são de responsabilidade do gerador. Nesse caso, os geradores são responsáveis pela destinação ambientalmente adequada dos resíduos gerados em seus processos, sendo esses passíveis de licenciamento ambiental.

Para o gerenciamento dos resíduos eletrônicos, há uma parceria firmada entre o poder executivo municipal e o Instituto Reversa, o qual recebe, acondiciona e destina os resíduos eletrônicos como pilhas, lâmpadas e baterias. Também há ecopontos específicos para esses resíduos, os quais são coletados e destinados por meio do projeto Energia Amiga. O projeto é coordenado pela professora Caroline Raduns da Unijuí e se dedica a trabalhar a logística reversa como tema de educação ambiental nas escolas e no comércio local.

Os resíduos oriundos de demolição, chamados RCC são coletados através de mutirões de limpeza realizado pela prefeitura e destinados por empresas especializadas. Atualmente o município fez um acordo de cedência de uma área para implementação de uma central de triagem de RCC através de uma parceria público privado.

Os resíduos coletados em mutirões de limpeza em pontos de depósito irregular, da limpeza de córregos e bueiros em vias públicas são, atualmente, gerenciados pelo

Serviço de Limpeza Urbana (SLU) e destinados através de containers de resíduos volumosos e construção civil.

4.2.4. Transbordo municipal

Todos os materiais coletados seguem diretamente para a estação de transbordo do município. A estação de transferência ou transbordo, como é comumente chamada, é o local onde se realiza o traslado dos resíduos de um veículo coletor a outro veículo com capacidade maior, sendo o segundo veículo o que transporta os resíduos para a destinação final. A estação de transbordo municipal fica localizada na Linha 4 Leste, S/N, e possui área total de 10.000 m².

Ao chegarem na estação de transbordo, os veículos carregados são identificados e encaminhados para a balança de pesagem. Após a pesagem ocorre a descarga dos materiais na rampa de transferência para carretas com capacidade maior de 50 m³ para a destinação final no aterro sanitário.

Os veículos de coleta descarregados são pesados novamente e realiza-se a emissão de tíquete que serve como comprovante da pesagem, contendo a data e hora da pesagem, placa do caminhão, nome do transportador, peso bruto, a tara e o peso líquido do caminhão. Esse comprovante serve como base para mensuração de pagamento mensal dos serviços realizados.

O material é transferido para as carretas de destinação final com o auxílio de uma retroescavadeira. O local também é utilizado como ecoponto de vidro e pneus, que são armazenados em galpão fechado com cobertura e piso impermeável e depois destinados para empresas especializadas. A Figura 11 demonstra as instalações do local.

Figura 11 - Estação de Transbordo



Fonte: O autor (2022).

4.2.5. Destinação final dos RSU

Em Ijuí, a maior parte dos RSU coletados é destinado para um aterro sanitário que fica a uma distância de aproximadamente 120 km de Ijuí/RS. A empresa conta com Licença de Operação para a aterro sanitário expedida pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul (FEPAM).

4.3. COLETA DE DADOS

As informações deste estudo foram coletadas mediante busca, leitura, seleção e fichamento dos materiais bibliográficos e documentais sobre o tema. Dessa forma construiu-se a etapa qualitativa do estudo. Para a etapa quantitativa, dados referentes a geração, coleta, transporte e destinação final de RSU no município em estudo foram coletados junto à Secretaria Municipal de Meio Ambiente e de fontes documentais do Plansab (MUNICÍPIO DE IJUÍ, 2018).

Para obtenção de dados de geração de RSU no município foram consultadas as bases de dados do Sistema Nacional de Informação de Saneamento (SNIS). Além disso, foram disponibilizados pelas associações de coletadores (ACATA e ARL6) por intermédio da Incubadora de Economia Solidária, Desenvolvimento e Tecnologia Social (ITECSOL) da Universidade do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ). Também foram coletados dados públicos disponibilizados por instituições governamentais. Essas incluem o Poder Executivo do Município de Ijuí, Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), Tribunal de Contas do Estado do Rio Grande do Sul (TCE/RS).

4.3.1. Determinação da composição gravimétrica dos RSU

A caracterização gravimétrica dos RSU do município foi realizada a partir de amostragem dos RSU no dia 04 de novembro de 2022. Para amostragem seguiu-se as técnicas estabelecidas nas normas ABNT nº 10.004 (ABNT, 2004a) e nº 10.007 (ABNT, 2004b).

Neste trabalho duas amostragens dos resíduos foram realizadas. Primeiramente, foi realizada a amostragem dos RSD proveniente da coleta convencional e, posteriormente, a amostragem dos rejeitos após as etapas de triagem realizadas nas duas associações de recicladores, ACATA e ARL6. Os seguintes critérios foram considerados no levantamento dos dados:

- Quantidade de resíduo recebido (t/dia);
- Origem do resíduo;
- Tipo de fornecimento;
- Estimativa da homogeneidade dos resíduos.

Os dados gravimétricos permitem observar as quantidades de cada um dos componentes da mistura de materiais.

Segundo a NBR nº 10.007 (ABNT, 2004b) para a coleta de sólidos em tambores, barris ou recipientes similares, montes ou pilhas de resíduos ou resíduos secos em tanques rasos e sobre o solo, recomenda-se o uso de uma pá e/ou amostrador de montes e pilhas “*Trier*”.

Para a realização da amostragem, inicialmente pesou-se o caminhão da coleta (Figura 12), e depositaram-se os materiais sobre a pista do transbordo.

Figura 12 - Pesagem do caminhão da coleta seletiva



Fonte: Fotografadas pelo autor (2022).

Após essa etapa, o caminhão foi pesado novamente, a fim de obter-se o peso líquido dos resíduos. Coletou-se os sacos dos lados e do topo da pilha. Após essa etapa aplicou-se o método de quarteamento. Dessa forma, chegou-se ao volume necessário para as amostras. Os veículos de coleta descarregados foram pesados novamente e realizou-se a emissão de tíquete que serve como comprovante da pesagem, contendo a data e hora da pesagem, placa do caminhão, nome do transportador e o peso bruto do veículo.

Após essa etapa foram preenchidos 4 tambores de 200 litros em 5 pontos diferentes da pilha de resíduos (topo e lateral). Na sequência, todo o conteúdo dos tambores foi despejado sobre uma lona plástica estendida no chão, onde os sacos foram abertos e os resíduos misturados.

Realizou-se o quarteamento com a finalidade de reduzir o tamanho da amostra. Depois que os materiais foram separados, cada fração foi colocada em um saco plástico devidamente identificado. Posteriormente, esses foram pesados e sua massa registrada. Após a pesagem realizou-se o cálculo da porcentagem sobre a massa total da amostra, de forma a obter-se a porcentagem em massa de cada fração. O total de material obtido após quarteamento foi separado em bombonas plásticas, pesado e depois foi feito novamente o espalhamento para serem separados nas seguintes frações:

- Matéria orgânica (restos de alimentos e folhas de vegetais);
- Secos recicláveis (papel/papelão; plásticos (PEAD, PEDB etc.); metais; poliestireno expandido (EPS); vidros; outros como madeira, borracha, trapos, espuma, couro; e rejeitos (papel de higiênico, fraldas).

A Figura 13 apresenta a técnica de quarteamento realizada para amostragem de RSD.

Figura 13 - Etapas de amostragem de RSD



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Depois que os materiais foram separados, esses foram colocados em baldes para serem pesados. Após a pesagem realiza-se o cálculo da percentagem sobre a massa total, de forma a obter-se a percentagem em massa de cada fração de material coletado, conforme suas especificações.

4.4. CENÁRIOS CONSIDERADOS

Para o estudo e a análise dos impactos causados pelas estratégias atuais e alternativas de gerenciamento de RSU do município de Ijuí/RS, foram definidos 8 cenários a partir do cenário base (situação atual).

Para a análise de cada cenário, utilizou-se o modelo WARM, Versão 15, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) e disponível gratuitamente. O WARM foi desenvolvido para gestores e organizações de resíduos sólidos para estimar impactos ambientais, econômicos e energéticos de diferentes formas de gerenciamento dos resíduos (USEPA, 2020).

Nessa ferramenta, os cenários base e alternativos podem ser construídos inserindo-se dados sobre a quantidade de resíduos manuseados por tipo de material e por prática de gerenciamento. Existem sessenta tipos de materiais (linhas) e seis práticas de manejo disponíveis (colunas): redução na fonte, reciclagem, compostagem, digestão anaeróbica, combustão, aterro.

Neste estudo, as práticas incluídas nos “cenários alternativos” encontram-se listadas a seguir:

- A. expansão do programa de coleta seletiva e incentivo à reciclagem;
- B. incentivo à compostagem;
- C. implantação de sistema de Digestão Anaeróbica (DA);
- D. recuperação energética por meio da combustão;
- E. redução do aterramento dos RSU.

No total, foram propostos e avaliados 5 cenários possíveis para o manejo dos resíduos de Ijuí/RS. Como cenário de base, utilizou-se os dados do SNIS (2021) no qual 4,3% dos resíduos foram reciclados e 95,7% dos resíduos foram aterrados. Os cenários foram estruturados de 1 a 5. O Cenário 1, prevê a expansão da reciclagem de forma atingir um aumento da taxa de reciclagem ao patamar de 30%. O cenário 2, após a expansão da coleta seletiva e aumento da reciclagem, trata da implantação de programa de incentivo a compostagem de forma a chegar em 10% dos resíduos orgânicos encaminhados para a compostagem.

O cenário 3 prevê a implantação de programa de DA. De acordo com a USEPA, é extremamente improvável que a mistura de resíduos urbanos seja enviada para a DA, sendo assim só considerou-se essa etapa após separados os resíduos recicláveis, dessa forma após expansão do cenário 3, previu-se a implantação de um

sistema de DA chegando a 15% dos RSU sejam destinados para esse tipo de tratamento.

O cenário 4 indica refere-se à implantação de recuperação energética dos rejeitos, após cumprimento da hierarquia de gestão de resíduos. Nesse cenário, chegou-se a aproximadamente 30% dos resíduos destinados através da recuperação energética por meio da combustão.

Por fim, no cenário 5, "lixo zero", previu-se que todos os RSU do município sejam destinados a combustão. Dessa forma, chegou-se ao um total de 45% dos RSU cumprindo-se os cenários como referência os dados da União Europeia com referência ao ano de 2019.

Não foram considerados na composição dos cenários os resíduos de serviços de saúde, resíduos eletrônicos e pneus. Os cenários avaliados foram apresentados de forma conjunta na Tabela 6.

Tabela 6 - Cenários base e alternativos considerados na gestão dos resíduos de Ijuí/RS

Cenários	Un	Recicla- gem	Compost agem	Digestão Anaeró- bica	Combustão	Aterra- mento	Total
	%	A	B	C	D	E	(A+B+C+D +E)
Base SNIS (2021)	t	835,00	0,00	0,00	0,00	18620,00	19455,00
	%	4,29	0,00	0,00	0,00	95,71	100,00
1	%	30,00	0,00	0,00	0,00	70,00	100,00
2	%	30,00	10,00	0,00	0,00	60,00	100,00
3	%	30,00	10,00	15,00	0,00	45,00	100,00
4	%	30,00	10,00	15,00	30,00	15,00	100,00
5	%	30,00	10,00	15,00	45,00	0,00	100,00
Referência UE (2019)	%	30,00	10,00	15,00	30,00	15,00	100,00

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Para a configuração do cenário base de gestão de resíduos de Ijuí/RS, foram considerados os dados relativos a um ano de geração e manejo dos resíduos. Foi considerado como dado de entrada a massa total de resíduos de 19.445,00 toneladas, que corresponde à soma de 4,3% dos resíduos destinada à reciclagem e 95,7% destinados ao aterro sanitário município no ano 2021.

O cenário base teve como referência os dados apresentados pelo município no SNIS (2021). Para prever a expansão de reciclagem, compostagem e outros tratamentos, utilizou-se dados da composição gravimétrica como referência. Os dados gravimétricos apresentam um potencial de aproximadamente 50% de resíduos orgânicos presentes nos RSU, 35% de materiais recicláveis e aproximadamente 15% de rejeitos.

A construção dos perfis dos cenários alternativos de gestão de resíduos teve como referência o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2022) com horizonte até 2040, os dados da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA, 2019) e os dados consolidados da União Europeia (UE) constantes do livro *Recovery of Materials and Energy from Urban Waste* (THEMELIS et al., 2019).

Cada um dos cenários alternativos encontra-se descrito nas subseções que seguem.

4.4.1. Expansão do programa de coleta seletiva e incentivo à reciclagem

Dados estabelecidos pela USEPA demonstram que, aproximadamente, 24% de materiais recicláveis são encaminhados para a reciclagem (USEPA, 2019). Já nos estudos da União Europeia referenciados por Themelis et al. (2016), chega-se, atualmente, a um montante de 30% reciclagem. Para o cenário brasileiro, utilizou-se como referência para a expansão do programa de reciclagem o Planares (BRASIL, 2022), o percentual de recuperação de materiais recicláveis de 20% até 2040.

Dessa forma, foram considerados cenários de expansão da reciclagem passando dos atuais 4,3% e chegando a 30% no cenário 1 e se mantendo nesse patamar até o cenário 5. Esses cenários consideram a reciclagem apenas dos resíduos com potencial para reciclagem (plásticos, vidros, papéis e metais).

4.4.2. Expansão de programa de incentivo à compostagem

Quanto à compostagem, inexistente uma prática constante desta ação no município de acordo com a pasta do Meio Ambiente, bem como não existem dados formalizados sobre sua utilização e benefícios à comunidade que aplica esse conceito.

A porcentagem de resíduos orgânicos a ser direcionada para essa prática foi modelada considerando-se os atuais 0% e seu incremento por meio do incentivo à compostagem para 10% (Cenário 2 da Tabela 6). Os estudos gravimétricos realizados apontam uma porcentagem de resíduos orgânicos de aproximadamente 50%, mostrando o potencial para implantação de um programa com incentivo a compostagem e DA como desvio dos resíduos orgânicos do aterramento. Destaca-se que os resíduos orgânicos são os principais fatores de impacto ambiental através do aterramento, pois emitem gases e geram lixiviado capaz de contaminar o lençol e mananciais do local.

4.4.3. Implantação de sistema de digestão anaeróbica

De acordo com a USEPA, é extremamente improvável que a mistura de resíduos urbanos seja enviada para a DA, por isso, essa opção de tratamento só foi

incluída na modelagem quando 100% dos resíduos recicláveis são separados na fonte, ou seja, 30% no cenário ideal para o município de Ijuí (USEPA, 2019).

Dessa forma, somente após o cenário de reciclagem chegar em 30% (cenários 1 ao 5) da Tabela 6 é que foram configurados a implantação do sistema de DA. Para esse cenário, chegou-se a um percentual de 15% dos RSU destinados à DA (BRASIL; 2022; USEPA, 2019). O total de resíduos orgânicos destinados para a compostagem e DA somam 25%. Os estudos gravimétricos apontam a presença de 50% de material orgânico nos RSU do município de Ijuí/RS o que nos resta 25% de materiais que precisam de destinação final após esgotar todas as alternativas de tratamento. Para isso, previu-se a recuperação energética dos rejeitos dos RSU.

4.4.4. Recuperação energética dos rejeitos

A recuperação energética é uma realidade concreta em diversos países para a destinação adequada dos resíduos sólidos urbanos. A tecnologia transforma os RSU em energia elétrica ou térmica, mediante processos amplamente utilizados ao redor do mundo, aproveitando o poder calorífico contido nos RSU. Importante ressaltar que plantas de RE não competem com o processo de reciclagem, muito pelo contrário, são empreendimentos que apoiam a reciclagem de alta qualidade e empregam a compostagem no processo de recuperação dos resíduos.

A maioria dos países com elevados índices de reciclagem e compostagem, também registraram elevados índices de tratamento térmico de resíduos, reduzindo a utilização de aterro a próximo de zero. Para cumprir com os objetivos propostos neste trabalho, buscou-se então a expansão dos cenários de recuperação energética dos rejeitos dos RSU. O modelo considerou a combustão de 30% dos RSU do município nos cenários 4, e 45% dos RSU do município nos cenários 5 da Tabela 6, com base na literatura de referência (UE, 2019; USEPA, 2018; BRASIL, 2022).

4.4.5. Redução e desvio da destinação ao aterro sanitário

Por fim, avaliou-se o cenário 5 considerado "lixo zero", nesse cenário, todas as alternativas de gestão se fizeram presentes nas análises, chegando a uma média de 30% dos RSU destinados para a reciclagem, 10% compostagem, 15% digestão

anaeróbica e 45% encaminhado para a recuperação energética, chegando-se a uma taxa de aterro de 0% dos RSU do município.

4.5. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS

Em todos os cenários considerados, foram avaliados os seguintes impactos:

- emissões GEE redução e geração em toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente - CO₂;
- energético em milhões de unidades térmicas britânicas (BTU) convertidos para *Joule* (J);
- econômico calculado em horas de trabalho, salários em dólar (US\$) e impostos em dólar (US\$).

Como mencionado anteriormente, a inclusão dos dados no sistema é feita a partir disposição das informações obtidas pelo usuário. O WARM então aplica automaticamente emissões dos materiais específicos e fatores econômicos para cada prática de gerenciamento para calcular as emissões de GEE, economia de energia e impactos econômicos de cada cenário. Vários dados importantes, como distâncias de transporte para instalações de RSU, podem ser modificados pelo usuário.

Algumas informações utilizadas na modelagem são fixadas pelo *software* WARM, não podendo ser alteradas e devem ser escolhidas no momento da modelagem. Todas as suposições assumidas foram descritas a seguir.

4.5.1. Avaliação dos impactos ambientais

Os impactos ambientais foram analisados a partir de cenários alternativos pré-estabelecidos na Tabela 6 usando o sistema WARM versão 15, da Agência de Proteção Ambiental dos EUA. No que se refere aos parâmetros a serem analisados em relação ao impacto ambiental da geração de RSU no município especificado, estes dizem respeito aos critérios de composição do WARM, buscando desenvolver uma análise criteriosa acerca da situação atual e prevendo cenários alternativos.

Para isso, foram calculadas e analisadas as emissões de GEE em toneladas de CO₂. Os fatores de emissão de GEE usados no WARM são baseados em uma perspectiva de ciclo de vida, o que possibilita extrapolar os dados para os resíduos de

outros países, entende-se que cadeia produtiva dos produtos é similar para os tipos de resíduos.

Os Cenários considerados foram construídos inserindo-se dados sobre a quantidade de resíduos manuseados no município, por prática de gerenciamento e tipo de material encontrado na gravimetria. O sistema contém seis práticas de manejo de resíduos disponível que foram avaliadas, são elas: redução na fonte, reciclagem, aterro, combustão, compostagem e digestão anaeróbica. Os impactos ambientais foram analisados a partir de cenários alternativos pré-estabelecidos na Tabela 6 e analisados através do sistema WARM.

4.5.2. Avaliação dos impactos energéticos

De acordo com a USEPA (2020), uma grande parte das emissões de GEE está relacionada ao uso de energia na aquisição de recursos, fabricação, transporte e estágios do ciclo de vida dos produtos gerados. Combustíveis e energia são recursos limitados e caros, para tanto, os impactos energéticos são mensurados no sistema WARM, o qual, mensura energia por Unidade Térmica Britânica (BTU), mas os resultados foram convertidos para unidades do sistema internacional – *JOULES*.

Os fatores de energia são calculados pela quantidade de energia necessária para produzir uma tonelada de certo material. A energia total consumida é resultado do consumo direto de combustível e eletricidade associado à aquisição e fabricação de matérias-primas, consumo de combustível para transporte e energia embutida. A energia necessária para o processo total de produção de uma tonelada de um determinado material é a soma da energia consumida em todos os tipos de combustível (USEPA, 2020, p. 71).

Nas simulações no WARM foram incluídos fatores de energia para cinco cenários de gerenciamento (reciclagem, combustão, aterro, digestão anaeróbica e redução). Os resultados emitidos pelo sistema apresentam a relação entre economia de energia e benefícios de GEE.

De acordo com a USEPA, conceituar a reduções de GEE em dados de tonelada métrica equivalente de dióxido de carbono e energia em BTU, implicam primeiramente em refletirem economias energéticas e não energéticas, e as economias de energia resultam em uma variedade de combustíveis fósseis. Para tanto, o sistema WARM

mensura a economia de energia convertida em equivalentes comuns, como barris de petróleo bruto ou galões de gasolina (USEPA, 2020, p. 73).

4.5.3. Avaliação dos impactos econômicos

Os impactos econômicos foram mensurados para avaliar o desempenho econômico do programa atual de gerenciamento de resíduos por meio dos levantamentos das receitas e despesas associados à coleta, ao transporte, ao transbordo e à destinação final dos RSU do município. Estes dados foram levantados por meio do Sistema Nacional de Saneamento (SNIS, 2021) e da Secretaria da Fazenda do município.

A análise econômica foi feita para os cenários alternativos mediante a análise dos indicadores do WARM. Para essa análise, o sistema mensura dados dos resultados de valores em salário e produção de impostos. De acordo com a USEPA, os fatores econômicos para emprego, salário e impostos foram calculados com base no estudo americano de informações econômicas sobre reciclagem, *Recycling Economic Information* (REI) publicado em 2001 (BECK, 2001) e atualizado em 2016 (U.S. EPA, 2016a). As métricas de impacto econômico do REI incluem atividades econômicas diretas e indiretas associadas à reciclagem, compostagem e digestão anaeróbica.

De acordo com a USEPA (2020), o estudo REI (BECK, 2001) foi a principal fonte para os fatores econômicos incorporados ao WARM porque o estudo quantificou o impacto econômico associado às atividades de desvio de resíduos em termos de métricas econômicas tradicionais (empregos, salários e atividade industrial).

O fator econômico para o emprego foi apresentado no estudo REI (BECK, 2001) como o número de empregos por tonelada métrica (e convertido em horas de trabalho para uso no WARM), enquanto os fatores salariais e tributários foram apresentados como milhares de dólares por tonelada métrica. Os valores levantados para renda do trabalho (salários) incluem todas as formas de renda do trabalho, remuneração do empregado (salários e benefícios) e renda do proprietário (USEPA, 2020).

A sustentabilidade financeira de qualquer sistema de gestão de resíduos combina as despesas com serviços de limpeza urbana, arrecadação para essa finalidade comparada com as despesas totais do município. Para complementar a

análise dos dados de impactos econômicos foram utilizados indicadores do Sistema Nacional de Informação de Saneamento (SNIS), com referência às despesas aplicadas ao manejo de resíduos sólidos no ano de 2021.

As despesas relacionadas à coleta de RSD e públicos, bem como dos resíduos de serviços de saúde, varrição de logradouros e vias públicas, foram obtidos juntamente à pasta de meio ambiente de Ijuí/RS. O transbordo e destinação final incluem despesas como as de operação e manutenção de escavadeira hidráulica necessária para o correto transbordo dos resíduos para as carretas responsáveis pela destinação final, e ainda, é necessário frisar a existência de outras despesas fixas administrativas, como manutenção de toda a infraestrutura da unidade de transbordo, energia elétrica, serviço de portaria, além de despesas eventuais necessárias à manutenção do funcionamento pleno deste serviço prestado aos munícipes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cumprir destacar que as realidades vivenciadas pelas populações de cada cidade influenciam de forma significativa nas possibilidades de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

Segundo o diagnóstico realizado a partir da base de dados do SNIS e da SMMA, o município de Ijuí/RS destinou em aterro sanitário no ano de 2021 aproximadamente 17.645 toneladas de RSU.

Já o SLU coletou aproximadamente 975 toneladas de resíduos, esses materiais consistem, principalmente, de serviços de podas da arborização urbana, mutirões de limpeza em pontos de depósito irregular, da limpeza de córregos e bueiros em vias públicas. Esses materiais são destinados em aterro de inertes do município de Ijuí/RS.

No que diz respeito aos resíduos eletrônicos foram coletadas cerca de 48 toneladas de resíduos, esses materiais são coletados através de campanhas de coleta seletiva de resíduos eletrônicos, esse material é coletado por meio de campanhas e *drive-tru* e destinado em parceria com o Instituto Reversa através de empresa especializada para a destinação de resíduos Classe I.

Os RSS gerados nas 29 unidades básicas de saúde presente no município são coletados por empresa contratada e encaminhados para tratamento em processamento de autoclave na cidade de Triunfo/RS. No ano de 2021, foram encaminhadas aproximadamente 15 toneladas de RSS para a destinação final, esse montante representa 0,1% dos materiais destinados.

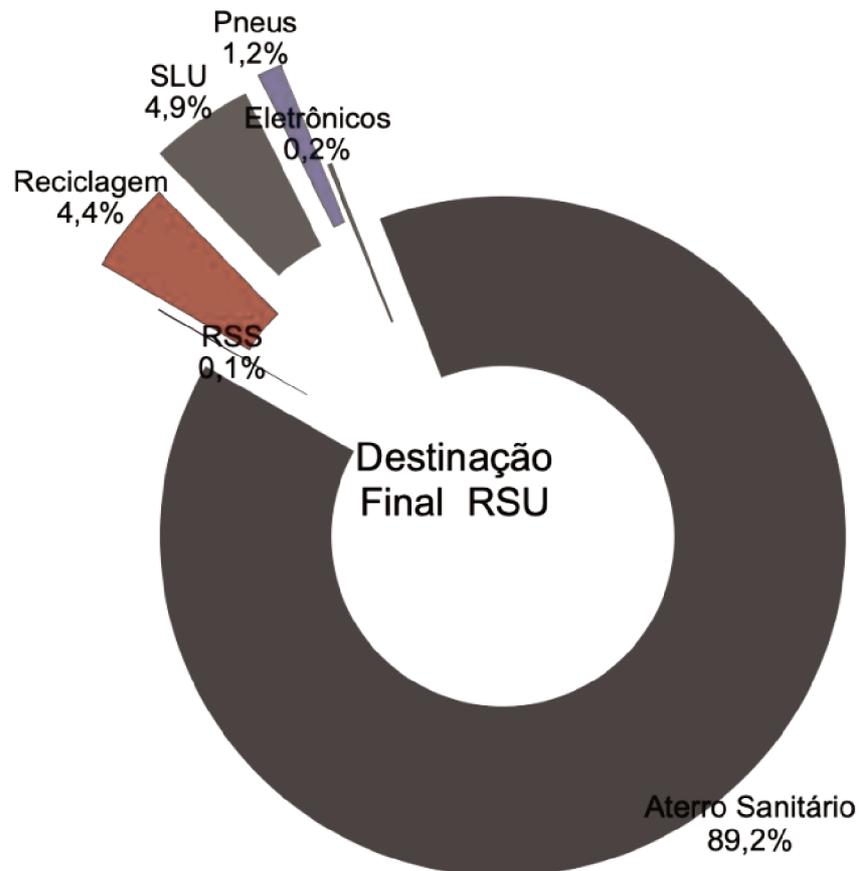
O município conta com ecoponto para a coleta de Pneus inservíveis, o ecoponto fica localizado na estação de transbordo do município e tem como responsável pela gestão a vigilância sanitária do município, a qual faz a fiscalização e recebimento desses materiais pelas empresas parceiras. No ano de 2021 foram recebidos no ecoponto 240 toneladas de pneus inservíveis. Os pneus são destinados pelo projeto Reciclanip que é a entidade gestora do programa de logística reversa de pneus inservíveis. Segundo a entidade os pneus são destinados para co-processamento, artefatos de borracha e asfalto de borracha. Os quantitativos e tipos de RSU destinados podem ser verificados na Tabela 7.

Aterro Sanitário	17.645
RSS	15
Reciclagem	864
SLU	975
Pneus	240
Eletrônicos	48
Totais	19.787

Fonte: SNIS (2022); SMMA (2021).

Do total de resíduos coletados, cerca de 90% foram encaminhados para aterro sanitário, apenas 4,4% foram reciclados nas associações de coletadores e 4,9% foram manejados pelo SLU e tiveram como destino o aterro de inertes, do município. Os pneus inservíveis são destinados através da logística reversa do programa RECICLANIP, cerca de 1,1% foram destinados no ano 2021 (SNIS, 2022; SMMA, 2022). A figura 14 refere-se à destinação final dos RSU destinados em Ijuí durante o ano de 2021.

Figura 14 - Destinação final dos RSU de Ijuí/RS em 2021 por tipo de destinação (t/ano)



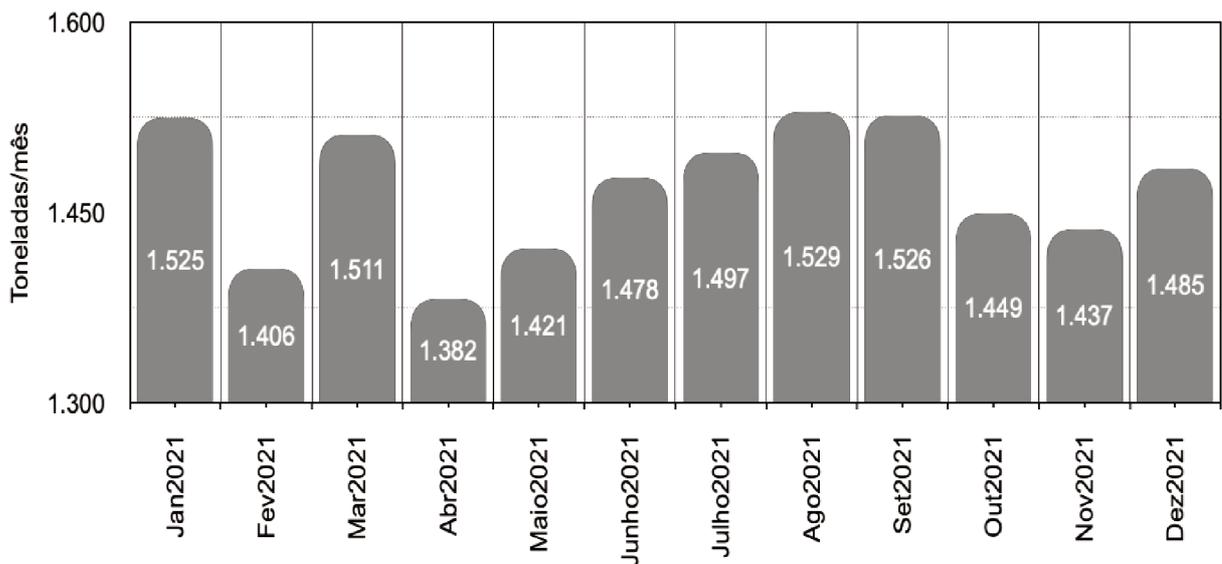
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

5.1. GERAÇÃO DE RSU

Com objetivo de melhor visualizar os dados diários e mensais de geração de resíduos no município de Ijuí/RS, utilizou-se os dados da planilha de controle diário do mês de agosto de 2021, fornecida pela empresa responsável pela coleta dos resíduos RSD e RSR.

A produção média *per capita* de resíduos, considerando-se a população total estimada de 84.041 habitantes segundo IBGE (2021) e a base de 30 dias de coleta, é equivalente a aproximadamente 1.481 toneladas. Esse valor correspondeu a uma taxa de geração *per capita* diária de aproximadamente 0,6 kg/hab.dia. conforme apresenta a Figura 15.

Figura 15 - Quantitativo mensal coletado - jan./2021 a dez.2021

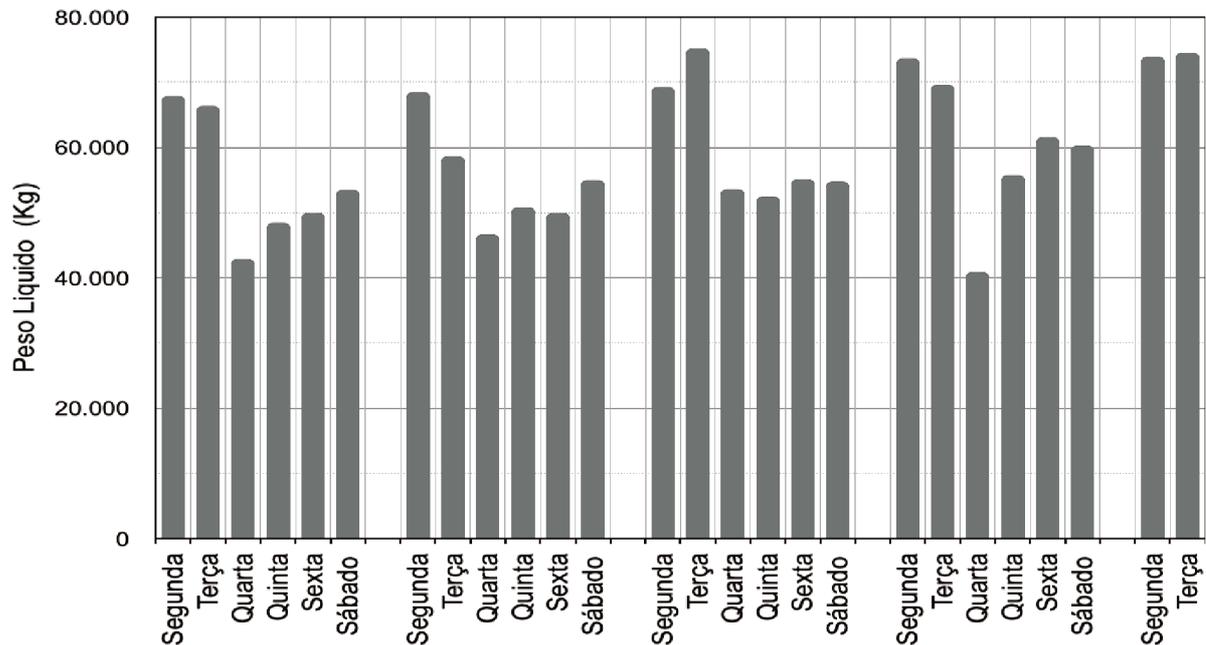


Fonte: SMMA (2021).

Segundo dados obtidos no estudo, atualmente gera-se uma média diária de 45 toneladas diárias de resíduos coletados diariamente em Ijuí/RS. A figura 7 apresenta os dados de uma maior geração nas segundas e terças-feiras, tendo uma redução nas quartas e quinta-feira e voltando a crescer na sexta-feira e no sábado.

Esses valores se dão pela maior geração de resíduos nos finais de semana, diminuindo no decorrer do meio da semana e voltando a crescer na quinta e na sexta-feira e se mantendo nos sábados (SMMA, 2021). A variação diária pode ser visualizada na Figura 16, que apresenta o controle diário de movimentação de RSU no município de Ijuí/RS.

Figura 16 - Controle diário de coleta de RSU - agosto 2021



Fonte: SMMA (2021).

A distância média percorrida para a execução do serviço de coleta seletiva é de 3.334 km por mês, totalizando 40.0080 km no ano de 2021. Para a coleta de RSD, segundo o projeto básico de contratação, foram percorridos, aproximadamente, 12.687 km por mês, totalizando aproximadamente 152.244 km por ano. Para a destinação final dos resíduos foram calculadas uma média de 166.320 km percorridos em 693 viagens para o aterro sanitário, totalizando 358.675 km rodados para execução dos serviços de coleta, transporte e destinação dos RSU do município em 2021.

O processo de manejo dos RSU no município de Ijuí/RS, onde conta com duas associações. Atualmente, segundo o levantamento dos dados do panorama dos RSU no município, em 2021, as associações de materiais recicláveis formalizadas, ACATA e ARL6, reciclaram juntas aproximadamente 864 toneladas de resíduos.

Desse total, 254 toneladas foram de papel sendo que as frações combinadas de papel e papelão corresponderam a 29% do material recuperado, os plásticos somam 109 toneladas recuperados um valor de aproximadamente 13%, já os metais somam o valor de 20 toneladas recuperados, o que equivale a apenas 2% dos materiais recicláveis, um valor baixo o que pode ser justificado pela presença de catadores informais no município que desviam esse tipo de material da coleta seletiva.

Os outros materiais somaram 117 toneladas reciclados somando aproximadamente, 14% dos materiais recicláveis.

A maior fração recuperada é o vidro, com aproximadamente 43%. Importante ressaltar que os vidros são os materiais de maior densidade e são coletados pela prefeitura municipal através de 111 ecopontos presentes no município e gerenciado pela SMMA. Esse é um importante fator de coleta seletiva e desvio desse tipo de material dos RSU. Estas informações encontram-se dispostas na Tabela 8.

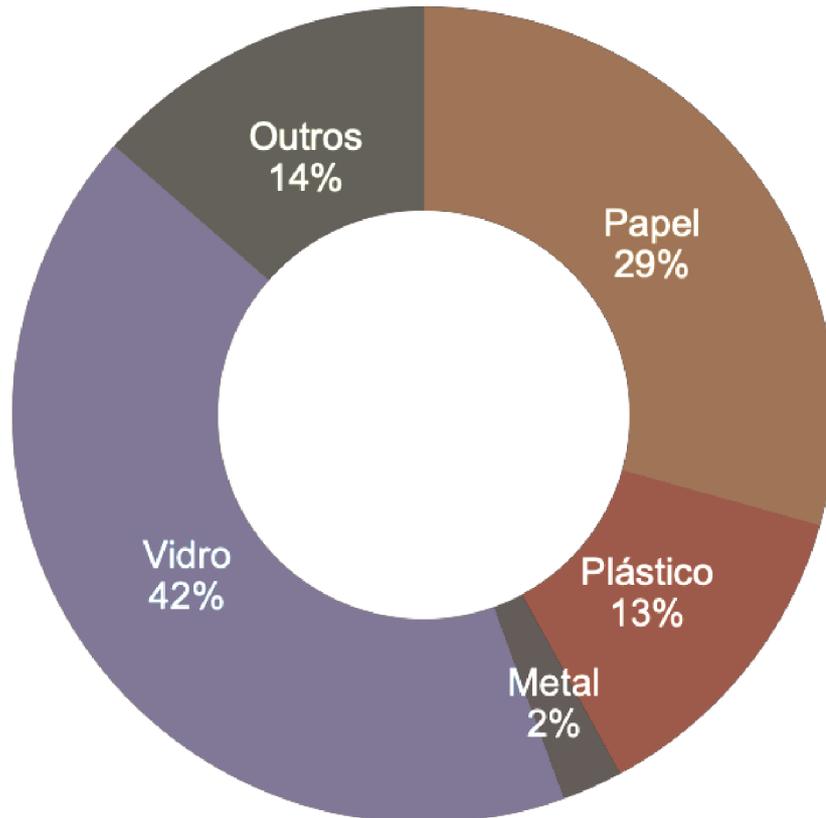
Tabela 8 - Materiais recicláveis dos RSU do município de Ijuí/RS

Materiais recicláveis	Quantidade
Papel	254
Plástico	109
Metal	20
Vidro	363
Outros	117
Total	864

Fonte: SNIS (2021); SMMA (2021)

Atualmente os materiais recicláveis recuperados configuram um cenário de aproximadamente 4,4% dos RSU do município, uma média baixa em relação ao potencial de reciclagem destes materiais, encontrado no estudo gravimétrico, esse valor reflete a média nacional que hoje é 4% dos resíduos recicláveis do Brasil. A Figura 17 demonstra a composição gravimétrica dos materiais recuperados nas associações (SNIS, 2021).

Figura 17 - Composição dos materiais recuperados na triagem dos resíduos de Ijuí/RS



Fonte: SNIS (2021)

5.2. COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA

A composição gravimétrica atual dos RSU gerados no município de Ijuí/RS constituiu o cenário base para este estudo. Os resultados da determinação da composição gravimétrica dos RSD provenientes da coleta convencional e dos rejeitos da triagem realizada nas duas associações de recicladores de Ijuí/RS, ACATA e ARL6, para os RSR das associações, encontrou-se uma porcentagem total de 42% de plásticos, vidros, papel e papelão, com frações correspondentes de 20%, 13% e 9%, respectivamente. Os resultados da análise gravimétrica praticado nesse estudo podem ser visualizados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultado da análise gravimétrica dos resíduos domiciliares e rejeitos das associações na cidade de Ijuí

Tipo de Resíduos	Amostra ACATA/ARL6	Amostra RSD	Porcentagem Média
Matéria Orgânica	34%	49%	42%
Papel/Papelão	9%	9%	9%
Plásticos	20%	17%	19%
Vidro	13%	2%	7%
Borracha	6%	1%	4%
Trapos	3%	3%	3%
Metais	2%	3%	3%
Poliestireno estendido	3%	2%	2%
Madeira	2%	0%	1%
Rejeitos	8%	12%	10%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Os resultados das análises mostraram que aproximadamente 49% dos materiais provenientes dos RSD são matéria orgânica, material reciclável ocupa 54% de materiais recicláveis. Rejeitos e oriundos das associações e nos RSD foram encontrados um valor de aproximadamente, 8% e 12%.

Rejeitos são materiais que, esgotadas todas as alternativas de separação, não apresenta possibilidade para a recuperação de materiais. Muitas vezes ele contém resíduos orgânicos misturados com plásticos e outros materiais que já não apresentam qualidade para a reciclagem, tais como papel, papelão, plásticos e poliestireno expandido sujos pelo contato com matéria orgânica como restos de alimentos, o que dificulta a possibilidade de destinação por meio de métodos como a compostagem e a reciclagem.

Esses dados mostram a uma quantidade de materiais remanescentes mesmo após a triagem dos resíduos, evidencia as limitações no sistema de triagem praticados atualmente no município, mostrando a necessidade de ampliação de programas de conscientização e educação ambiental da população.

Os materiais como poliestireno expandido, madeira e borracha também foram encontrados nos materiais recicláveis e podem ser aproveitados como combustível derivado de resíduos devido seu alto poder calorífico e potencial energético, esses materiais representaram, juntos, 14% dos materiais encontrados nas amostras dos resíduos das associações de recicladores do município.

Da mesma forma, para os RSD também foi encontrada uma grande quantidade de material passível de reciclagem. No total, aproximadamente 31% dos resíduos

amostrados foram materiais como papel, papelão, plástico, metais e vidro. Diante disso, os resíduos plásticos tiveram uma porcentagem de 17%, seguidos de papel e papelão com 9% e metais com 3%. Os vidros representaram uma quantidade menor, de apenas 2%, o que mostra uma certa eficiência da coleta dos vidros nos ecopontos do município.

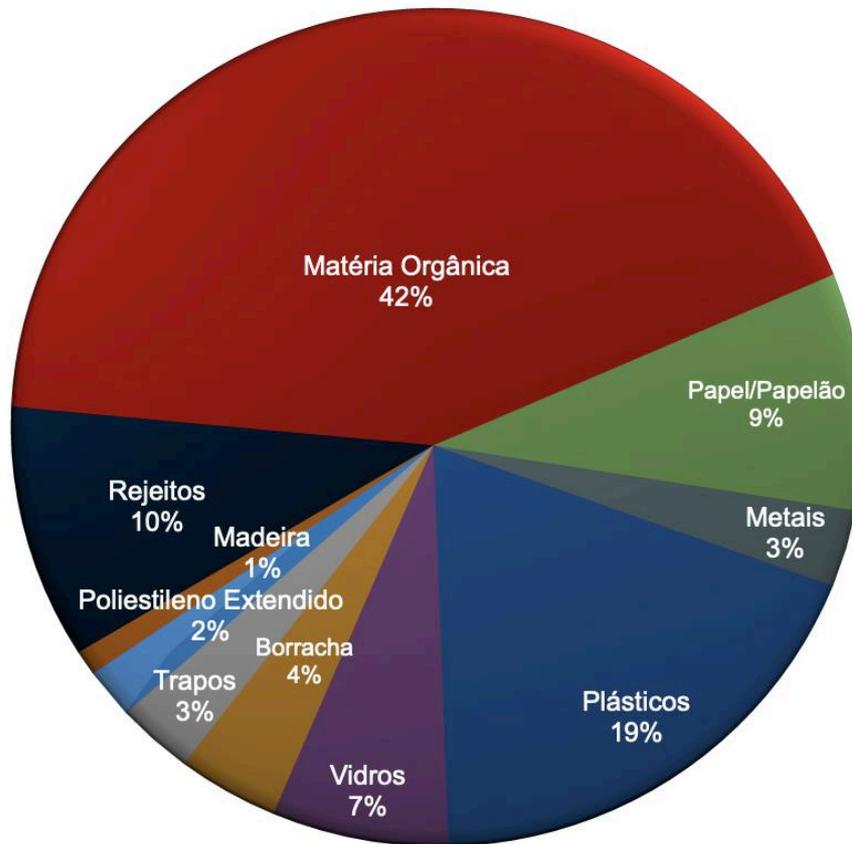
Borracha, trapos, poliestireno expandido e madeira também foram encontrados com valores de 6% e representam tipos de materiais que precisam ser destinados de outra forma que não seja o aterramento. O quadro de composição dos materiais também mostra a média de materiais presentes nas análises gravimétricas para que possamos melhor visualizar e propor estratégias de gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos do município de Ijuí/RS.

Vale ressaltar que, apesar das amostras terem apresentado materiais orgânicos compondo a fração majoritária, existe uma grande quantidade de materiais recicláveis que podem ser destinados para o aumento da taxa de reciclagem. Outro valor considerado foi a quantidade de rejeitos e materiais como poliestireno expandido, borracha e trapos, esses materiais podem ser processados e utilizado para uma destinação através da combustão e cumprimento da PNRS que diz que os materiais devem ser encaminhados para esse tipo de destino após esgotarem suas possibilidades de reciclagem.

Nesse caso, tem-se como opção o emprego dessa fração de rejeito e demais materiais para o desenvolvimento de CDR ou conversão térmica a partir da combustão. Analisando-se as duas amostras, tem-se uma porcentagem significativa deste material, que corresponde a, aproximadamente, 1.945 ton/ano.

A Figura 18 apresenta a composição gravimétrica dos RSD do município de Ijuí/RS.

Figura 18 - Composição gravimétrica média dos RSD de Ijuí/RS



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.3. DADOS FINANCEIROS

Uma análise de custo-benefício foi realizada para avaliar o desempenho econômico do atual programa de gestão de resíduos (cenário base) e das alternativas de gestão de resíduos (cenários alternativos). Os resultados dessa análise podem ser observados na Tabela 10, na qual constam as despesas com os serviços de manejo de RSU de Ijuí/RS.

Com base nos gastos estimados incorridos em 2021 e dados disponibilizados pela SMMA, as despesas unitárias com serviços de manejo de RSU no ano de 2021 foi de aproximadamente R\$ 6.233.038,12 sendo, o maior custo a coleta dos RSU com R\$ 3.470.770,43. Transbordo e destinação final em do aterro sanitário tiveram um custo de R\$ 2.372.073,21. Com base nos gastos estimados incorridos em 2021 e dados disponibilizados pela SMMA, o custo unitário do aterro é de R\$128/tonelada. totalizando uma média de R\$ 292,26/tonelada coletada e destinada (SMMA, 2021).

Os recursos aplicados pelo município de Ijuí no sistema de coleta de resíduos domiciliares e públicos, coleta de resíduos de serviço de saúde, varrição de logradouros e demais serviços como despesas administrativas de aterramento, transbordo, tratamento e destinação final dos RSU ultrapassaram os R\$ 6.233.074,11 milhões, esse valor equivale a uma média de R\$ 6,00 por habitante/mês e totalizando aproximadamente R\$ 74,00 por habitante no ano de 2021 (SMMA 2021; SNIS 2021). Esse valor está abaixo da média nacional identificado como R\$ 10,15 por habitante/mês (ABRELPE, 2021).

A Tabela 10 demonstra as despesas do município de Ijuí com a gestão de RSU, com base no ano de 2021.

Tabela 10 - Diagnóstico e despesas do município de Ijuí/RS em 2021 com o manejo de RSU

Indicadores	Unidade
População total	84.041 habitantes
População urbana	76.198 habitantes
População rural	7.843 habitantes
Quantidade total de resíduos coletados	17.645,00 t
Taxa de geração <i>per capita</i> de resíduos	0,64 kg/dia
Taxa de geração diária de resíduos	45 t/dia
Média mensal de geração de resíduos	1.500 t/mês
Associações de coletadores de resíduos	2
Recicláveis recuperados	825,0 t
Destinação dos resíduos	17.645,00 t
Taxa de destinação em aterro	90%
Despesa com coleta de resíduos domiciliares e públicos	R\$ 3.470.770,43/ano
Despesa com resíduos dos serviços de saúde	R\$ 241.645,80/ano
Despesas com varrição de logradouros públicos	R\$ 188.548,68/ano
Despesas com transbordo e destinação final (inclui despesas administrativas)	R\$ 2.332.073,21/ano
Despesa/custo anual com o manejo de RSU	R\$ 6.233.074,11/ano
Receita orçada pela prefeitura de Ijuí/RS em 2021	R\$ 8.689.900,01/ano
Receita arrecadada	R\$ 10.495.925,22/ano
Despesas correntes de todos os serviços da prefeitura	R\$ 255.127.925,22/ano

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de SNIS (2021).

Uma análise de custo-benefício foi realizada para avaliar o desempenho econômico do atual programa de gestão de resíduos e as alternativas de gestão de resíduos. A prefeitura municipal cobra pelos serviços de coleta regular, incluindo

transporte e destinação final dos RSU. A forma adotada para a cobrança é por taxa específica do Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU). Segundo dados da Secretaria da Fazenda do município, no ano de 2021 a receita arrecadada com taxas e tarifas referente à gestão e manejo de RSU foi de aproximadamente R\$ 10.495,497,24.

5.4. AVALIAÇÃO DOS CENÁRIOS BASE E ALTERNATIVOS NO WARM

Utilizou-se o sistema WARM, Versão 15, desenvolvido pela USEPA (2021), para a análise dos impactos das diferentes estratégias de gerenciamento de RSU comparativamente ao cenário base que representou a condição de referência deste estudo.

A composição gravimétrica dos RSU e os dados quantitativos caracterizam o cenário base (atual) e foram utilizados para a configuração dos cenários e compilação dos dados. Para a introdução dos dados no sistema WARM e análise dos cenários comparativos adotou-se os tipos de materiais “misturados” conforme indica o guia de análises do WARM, os quais são definidos da seguinte forma:

- *Mix* de recicláveis, como referência quantitativa dos materiais recicláveis e expansão do programa de reciclagem estes são compostos por latas de alumínio 1,3%, latas de aço 2,4%, vidro 6%, plástico PEAD 1,2%, Pet 1,8%, embalagens de papelão 56,8%, revistas/correios 7,3%, jornais 9,6%, papel de escritório 7,8%, livros didáticos 0,6% e madeira 5,2%;
- *Mix* de resíduos orgânicos para a expansão do programa de compostagem e biodigestão, o sistema adota uma média de resíduos de alimentos 53% e resíduos de jardinagem 47%;
- *Mix* de RSU foram considerados para a redução do aterro e destinação dos rejeitos para a recuperação energética desta forma o mix de RSU considerado no guia do WARM é constituído de 5,2% de gramas, folhas 6,8%, galhos 5%, madeiras 5,1%, resíduos de alimentos 28,2%, metais 2,3%, vidros 4,4%, revistas/correios 2,7%, jornais 4,5%, papel e papelão 26,6%, outros (como têxteis, borracha/couro) com 8,8%.

Após a inclusão dos dados no WARM, o sistema calcula as emissões de GEE, energia e impactos econômicos atribuídos a um cenário base na coluna 1 e cenário alternativo na coluna 2 de gestão de resíduos. Inicialmente, foi realizada a análise dos

impactos ambientais, energéticos e econômicos do cenário base de gestão de resíduos no município de Ijuí/RS.

Ressaltando-se que não foram considerados na composição dos cenários os resíduos de serviço de saúde e resíduos eletrônicos. Os cenários desenvolvidos e os fluxos de resíduos para o cenário base e para os cenários alternativos de gestão dos resíduos são mostrados na Tabela 11. Observa-se que os cenários se apresentam em um horizonte de 5 alternativas buscando o cenário de referência, no qual 100% dos resíduos são desviados do aterro sanitário e encaminhados para outras estratégias de gestão.

Tabela 11 - Fluxo de resíduos nos cenários base e alternativos

Cenários	Un	Recicla- gem	Compos- tagem	Digestão Anaeró- bica	Recupe- ração Energé- tica	Aterro	Total
		A	B	C	D	E	(A+B+C+ D+E)
Base SNIS (2021)	t	835,00	0,00	0,00	0,00	18.620,00	19.455,00
	%	4,29	0,00	0,00	0,00	95,71	100,00
1	t	5836,00	0,00	0,00	0,00	13.619,00	19.455,00
2	t	5836,00	1945,00	0,00	0,00	11.674,00	19.455,00
3	t	5836,00	1945,00	2918,00	0,00	8.756,00	19.455,00
4	t	5836,00	1945,00	2918,00	5836,00	3.020,00	19.555,00
5	t	5836,00	1945,00	2918,00	8856,00	0,00	19.555,00
Referên- cia UE (2019)	%	30,00	10,00	15,00	30,00	15,00	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A avaliação dos cenários realizada neste trabalho foi limitada ao período de um ano de geração e manejo dos resíduos (2021). Foi considerada a entrada de aproximadamente 19.445,00 toneladas de RSU no sistema (SNIS, 2021). Esse valor corresponde à destinação de 835,00 toneladas de resíduos para a reciclagem e 18.620,00 toneladas de resíduos que foram destinados ao aterro sanitário sem captura de gás pelo município de Ijuí/RS no ano de 2021.

Para o cenário base, um total de 95,7% dos resíduos foram aterrados e aproximadamente 4,3% foram encaminhados para a reciclagem. Em relação à distância média utilizada para a destinação dos RSU no cenário base, empregou-se a distância de 120 km percorrida no ano de 2021 em cada viagem para a destinação final dos resíduos no aterro sanitário (74 milhas), e foi considerada a distância de 20 km (13 milhas) como aquela a ser percorrida pelos resíduos para outras estratégias

de gestão, alternativas ao aterramento. A Tabela 12 apresenta a composição dos RSU incluídos no WARM onde, para a introdução dos dados no WARM, dividiram-se os materiais recicláveis por tipo (*mix* de papel, *mix* de plásticos, *mix* de metais, vidros e *mix* de RSU).

Tabela 12 - Dados de entrada no WARM por tipo de resíduos

Material	Reciclados (t)	Aterrado (t)
<i>Mix</i> de papel	255,00	
<i>Mix</i> de Plástico	110,00	
<i>Mix</i> de Metais	107,00	
Vidros	363,00	
<i>Mix</i> de RSU		18.620,00
Total	835	19.455,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.4.1. Análise dos Impactos ambientais da gestão de RSU no cenário base

O sistema WARM avalia o impacto do ciclo de vida completo dos materiais (incluindo emissões de GEE) associado a extração, fabricação ou processamento de matérias primas, transporte, uso e gerenciamento do ciclo de vida de um bem ou serviço.

No Quadro 4 encontram-se os resultados apontados pelo WARM para emissões de GEE em toneladas de dióxido de carbono equivalente - tCO_{2e}. O Quadro 4 apresenta as emissões de GEE para cada tonelada de diferentes tipos de materiais incluídos no sistema WARM.

Quadro 4 - Impactos do ciclo de vida e emissões de GEE no cenário base em MTCO₂

Material	Toneladas de RSU	Emissões de GEE para a Produção (MTCO₂)	Emissões de GEE da Reciclagem	Emissões de GEE para o Aterramento	Produção + Impacto do ciclo de vida (MTCO_{2e})
<i>Mix</i> de Papel	255	1.549	(904)		644
<i>Mix</i> de Plástico	110	206	(102)		104
<i>Mix</i> de Metais	107	390	(470)		(80)
Vidros	363	193	(101)		92
<i>Mix</i> de RSU	18620			23.825	23.825
Total	19455	2.338	(1.577)		22.248

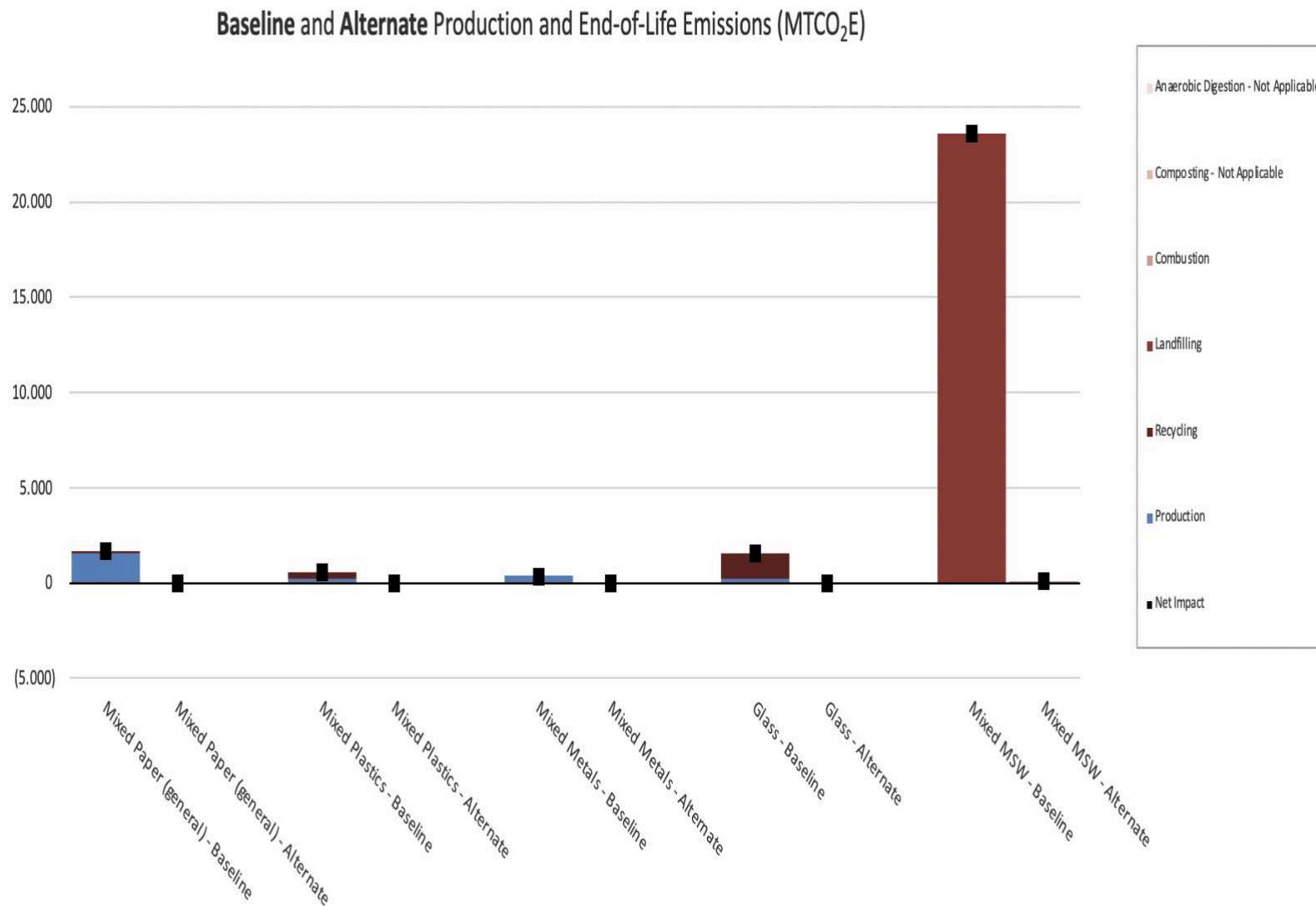
Fonte: Elaborado pelo autor; adaptado do WARM (2022).

Para o cenário base atual, os dados mostram que no ano de 2021 o município de Ijuí/RS emitiu o equivalente a 23.824,91 milhões de toneladas de CO_{2e} na atmosfera com o aterramento dos RSU. Já a reciclagem dos RSU gerados no município contribuiu com a redução na ordem de 1.577 milhões de toneladas de CO₂ equivalente.

Observa-se que se o valor das emissões de GEE for negativo, significa que essas emissões foram evitadas durante a gestão desse tipo de material. O saldo das emissões totais de GEE para a gestão dos RSU no município de Ijuí/RS no cenário base é de 22.248 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) equivalente.

A Figura 19 apresenta graficamente as emissões para a produção de matérias-primas bem como as emissões evitadas através da reciclagem, e por fim as emissões de GEE para o aterramento dos RSU no município.

Figura 19 - Análise das emissões de gases de efeito estufa e do ciclo de vida dos produtos no cenário base em milhões de toneladas de CO₂E



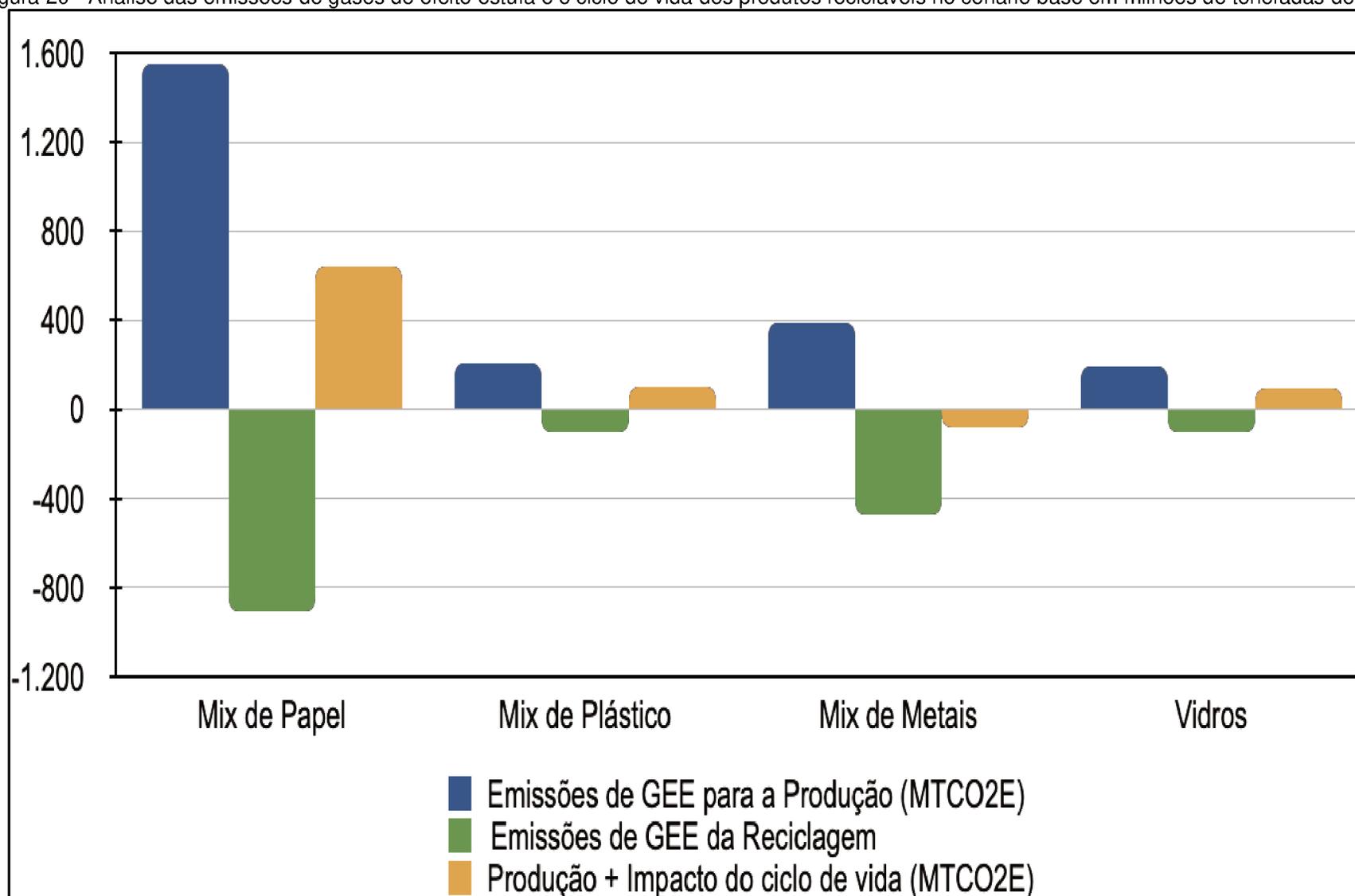
Fonte: WARM (USEPA, 2019).

Por meio da análise detalhada do ciclo de vida da reciclagem 'mix de papel' observa-se que ocorre uma redução de emissão de 904,40 milhões de toneladas de CO₂ equivalente para a reciclagem de 255 toneladas de papel, esse valor indica uma diferença de emissão entre a produção e o ciclo de vida do produto na casa de 644,40 milhões de toneladas de CO₂ equivalente para a reciclagem de papel.

Para a produção de novos produtos do *mix* de plástico, gera-se 206,07 milhões de toneladas de CO₂ equivalente para a produção de 110 toneladas de plástico. Produtos plásticos reciclados geram aproximadamente uma redução de 101,93 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, o que resulta em uma redução de 104,14 milhões de toneladas de CO₂ equivalente para a reciclagem de plásticos. As emissões para a produção de metais a partir da extração da matéria-prima está na ordem de 390,45 milhões de toneladas de CO₂ equivalente.

A redução das emissões de GEE para a reciclagem de 107 toneladas de *mix* de metais é de 469,98 milhões de toneladas de CO₂ equivalente. Importante destacar que o *mix* de metais obtivera um valor negativo ao analisar o impacto da produção a partir de materiais virgens e em relação a reciclagem, totalizando uma redução de 79,53 milhões de toneladas de CO₂ equivalente para o *mix* de Metais. Esse valor indica que os metais são os materiais com maior poder de redução das emissões de GEE se reciclados. Na figura 20 verificam-se as emissões para a produção metais a partir de matéria-prima é maior do que as emissões geradas pela reciclagem de novos metais. Observa-se que 390,45 milhões de toneladas de CO₂ equivalente e 469,98 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, respectivamente, totalizando redução nessas emissões de 79,53 milhões de toneladas de CO₂ equivalente.

Para a produção de vidros, a geração foi de 192,69 milhões de toneladas de CO₂, equivalente a 100,64 milhões de toneladas de CO₂ equivalente seriam produzidas na reciclagem de vidros, com redução de, aproximadamente, 92,05 milhões de toneladas de CO₂. A Figura 20 ilustra a produção de GEE no cenário base.

Figura 20 - Análise das emissões de gases de efeito estufa e o ciclo de vida dos produtos recicláveis no cenário base em milhões de toneladas de CO₂

Fonte: Warm (s/a)

5.4.2. Análise dos impactos energéticos da gestão de RSU no cenário base

Os impactos energéticos são calculados pela quantidade da energia que é a soma da energia consumida de combustível e eletricidade associados à aquisição e fabricação de matérias-primas, consumo de combustível para transporte e energia contida no processo de gestão de resíduos.

Os resultados para o total de energia consumidos no gerenciamento de RSU do cenário base para o aterramento dos RSU foi de 7.136,18 milhões de BTU. O total de energia gerada para o processo de gerenciamento no cenário base por tonelada foi aproximadamente 9.864,89 milhões de BTU. O Quadro 5 apresenta os valores energético utilizado para a produção de diferentes materiais (Papel, plástico metais, vidros e RSU). Os dados comparam a energia necessária para a produção de novos materiais e o impacto gerado durante o ciclo de vida do produto.

Quadro 5 - Impactos Energéticos no Cenário Base (BTU)

Materiais	Energia usada para a produção (milhões de BTU)	Energia usada para a reciclagem	Energia usada para aterramento	Produção + Impacto no ciclo de vida (milhões de BTU)
<i>Mix de Papel</i>	7.507,98	(5247,65)		2.260,32
<i>Mix de Plástico</i>	5.987,36	(3854,06)		2113,30
<i>Mix de Metais</i>	5.442,14	(7122,43)		(1680,29)
Vidros	2.506,36	(776,18)		1729,42
Mix de RSU			7136,18	7136,18

Fonte: Warm (s/a)

O *mix* de papel apresenta um consumo energético de redução de 5.247,65 BTU com a reciclagem de 255 toneladas de papel. A análise do gasto energético para a produção de *mix* de papel tem o valor de 7.507,98, isso mostra que a relação do impacto do ciclo de vida do produto e o consumo energético equivalente a 2.260,32 milhões de BTU.

O *mix* de plástico apresenta um valor de redução de 3.854,06 BTU para a reciclagem de 110 toneladas de plásticos. O gasto energético para a produção de plástico a partir de novas matérias primas foi de 5.987,36 milhões de BTU. A energia utilizada para a produção mais os gastos de ciclo de vida da mesma quantidade de plástico é de 2.113,30 milhões de BTU.

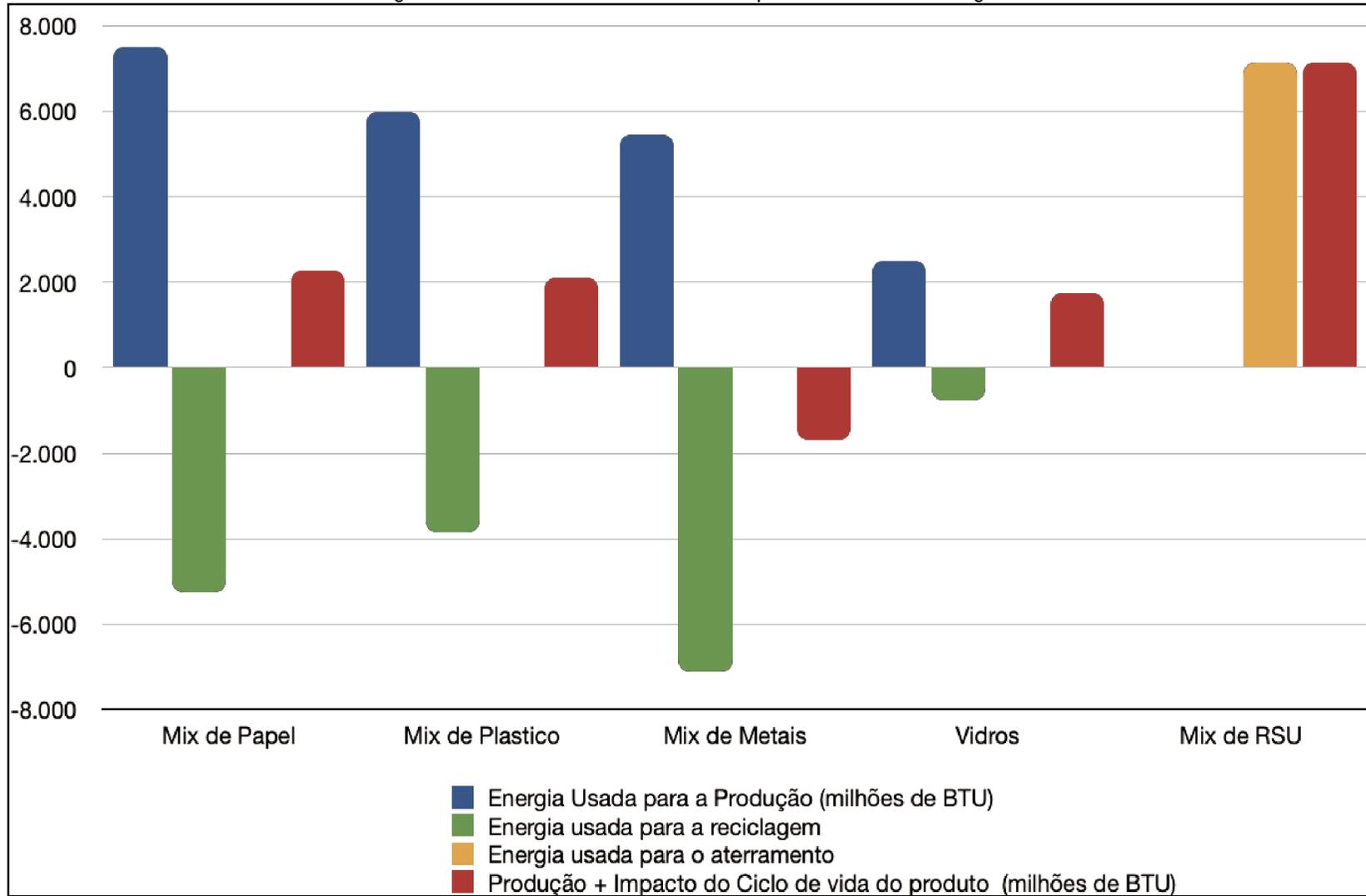
A análise dos dados de *mix* de metais apresenta-se um valor de 5.442,14 milhões de BTU para a produção de novos metais. Neste caso, a energia utilizada para a destinação através da reciclagem ocorre uma redução no consumo de energia de aproximadamente 7.122,43 BTU. Os dados mostram (1.680,29) milhões de BTU, segundo manual do sistema WARM isso explica, por exemplo, que latas de alumínio possuem um custo de reciclagem menor do que a fabricação de latas a partir de novos insumos.

Para a produção de 363 toneladas de vidro são consumidos o equivalente a 2.506,36 milhões de BTU, já para a reciclagem utiliza-se um valor de (776,93) milhões de BTU, o saldo energético para a produção e o ciclo de vida dos vidros é de 1.729,42 milhões de BTU. O cenário para os vidros mostra uma redução menor, indicando o consumo de mais energia para a reciclagem de vidro.

Os dados apresentados no WARM permitem relacionar o impacto energético do ciclo de vida dos materiais para diferentes cenários de gerenciamento. Ao relacionar a energia consumida para o descarte em aterro de 95,7% dos RSU, com a reciclagem de 4,3% o montante gerado no ano de 2021 no município de Ijuí/RS, podemos observar que a reciclagem dos materiais como mix de papel, plástico, metais e vidro é a melhor opção em relação ao aterramento, se compararmos a energia utilizada para a produção de novos produtos (azul) e a energia usada para a reciclagem (verde) em todos os casos temos a redução do consumo energético.

Dados do sistema WARM com valor negativo mostram que ocorre economia de energia por tonelada de material reciclado (milhões de BTU). Conforme mostrado na Figura 21 economias significativas de energia também resultam da reciclagem de produtos secundários, evitando assim os processos de uso intensivo de energia necessários para fabricar esses produtos (USEPA, 2020, p. 71).

Figura 21 - Análise do ciclo de vida do produto e uso de energia



Fonte: WARM (s/a)

5.4.3. Análise dos impactos econômicos da gestão de RSU no cenário base

Os resultados de impactos econômicos são gerados no WARM a partir de métricas de emprego, salário e produção de impostos. Dados econômicos calculados a partir das horas trabalhadas em atividades relacionadas à gestão de resíduos resultaram em um cenário base total de 47.941 horas trabalhadas para a gestão dos RSU no município de Ijuí/RS.

O impacto econômico da gestão de RSU em Ijuí emitidos pelo WARM apresentou em um total de US\$ 1.396.592,85 em despesas para o gerenciamento dos RSU.

Esse valor representa um total de gastos para a reciclagem de 255 toneladas de *Mix* de papel na casa de \$ 55.625,85, gerando um total de gastos para a reciclagem de 110 toneladas de *Mix* de Plásticos no valor de \$ 146.183,52. O total gasto para a reciclagem de 107 toneladas de metais é de \$ 157.539,84 e o total gasto para a reciclagem de 363 toneladas de vidros é de \$ 177.930,63.

O custo total para a reciclagem de 835 toneladas de materiais é de \$ 537.279,85. Já o custo total para a destinação final de 18.620 toneladas de RSU através do aterramento, o sistema WARM apresentou um custo de \$ 859.313,00.

Os dados emitidos pelo WARM foram comparados com os gastos e despesas apontados pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente ao SNIS (2021). Dessa forma, os recursos aplicados pelo município de Ijuí no sistema de coleta de resíduos domiciliares e públicos, coleta de resíduos de recicláveis, varrição de logradouros e demais serviços como despesas administrativas de aterramento, transbordo, tratamento e destinação final dos RSU ultrapassaram os R\$ 6.233.074,11.

Se considerarmos a cotação do dólar comercial no ano de 2022 temos R\$ 5,30 reais por dólar. Considerando o total de R\$ 6.982.960,00 apontados no sistema WARM. Este valor permite relacionar os valores apresentados no WARM e os valores apresentados no cenário atual do município para validação do sistema.

Em virtude de os dados emitidos pelo WARM considerarem o cenário norte-americano, eles foram comparados com os gastos e despesas apontados pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Ijuí/RS ao SNIS para o ano 2021. Dessa forma, os recursos aplicados por esse município no sistema de coleta de resíduos domiciliares e públicos, coleta de resíduos de recicláveis, varrição de logradouros e

demais serviços como despesas administrativas de aterramento, transbordo, tratamento e destinação final dos RSU ultrapassaram os R\$ 6.233.074,11 e representa um investimento de R\$ 73,3 por habitante/ano, o equivalente a uma média de R\$ 6,10 por habitante/mês, abaixo da média nacional.

5.4.4. Análise dos impactos para a expansão dos programas de gestão alternativa dos RSU

Neste estudo, as alternativas de expansão de gestão dos RSU foram consideradas a partir do aumento da prática de reciclagem, compostagem, DA e recuperação energética.

Para isso, o cenário base é expandindo para 30% de reciclagem no cenário 1, 10% de compostagem no cenário 2, 15% de DA no cenário 3, e para recuperação energética considerou uma expansão de 30% cenário 4.

Os resultados gravimétricos dos rejeitos das associações mostram que há um potencial de aproximadamente 35% de materiais passíveis de reciclagem como (papel, plástico, vidro e metais), a matéria orgânica representa aproximadamente 34%, e os rejeitos contam com aproximadamente 8% e trapo, borracha, poliestileno estendido e madeira ainda somam 14%.

Configurou-se a planilha de cenários do WARM com os dados destes cenários, no qual adotou-se uma expansão de um valor de 5.836 toneladas de recicláveis. Para o cenário 2, considerou-se um valor total de 1.945 toneladas para compostagem. No cenário 3, um valor de 2.918 toneladas foi calculado para a expansão de digestão anaeróbica. O cenário 4 foram previstos a recuperação energética de 30% dos RSU. Nesse cenário apenas 15% dos RSU são aterrados.

5.4.5. Impactos ambientais

Neste subitem analisou-se os resultados dos impactos ambientais do cenário base (atual) e prospectando 5 novos cenários de gestão de resíduos com aplicação do conceito hierarquia de gestão de resíduos.

Os resultados apresentados pelo sistema WARM mostram as emissões de GEE no cenário atual. Aproximadamente 20.066,84 milhões de toneladas dióxido de carbono equivalente (CO₂) são emitidos no município de Ijuí através da destinação final dos RSU pelo método de aterramento. A redução de emissões dos GEE através da prática de reciclagem dos RSU do município é de aproximadamente 2.383,45 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂), são evitadas através da prática de reciclagem atualmente. A figura apresenta o cenário base e alternativo prospectados simultaneamente. Observa-se que os resíduos recicláveis possui o maior potencial de redução de emissões de GEE. No cenário alternativo de aumento de reciclagem temos a maior redução dos GEE na faixa de 16.658,46 milhões de toneladas de CO₂ equivalente.

Já o cenário 2 para a expansão da compostagem temos uma redução das emissões de efeito estufa em relação ao aterramento dos RSU. Nesse cenário as emissões geradas pelo aterramento de resíduos orgânicos foram de 6.635,18 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂) e para o cenário 2 (compostagem) observaram-se uma redução das emissões na faixa de 170,35 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂). Para o cenário 3 (digestão anaeróbica) verificou-se uma redução de emissões de 189,57 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂).

De acordo com a USEPA, é extremamente improvável que o RSU misturado seja enviado para a digestão anaeróbia (DA), por isso, essa opção de tratamento só foi incluída na modelagem quando 100% dos resíduos recicláveis são separados na fonte (USEPA, 2019), ou seja 30% no cenário ideal para o município de Ijuí/RS.

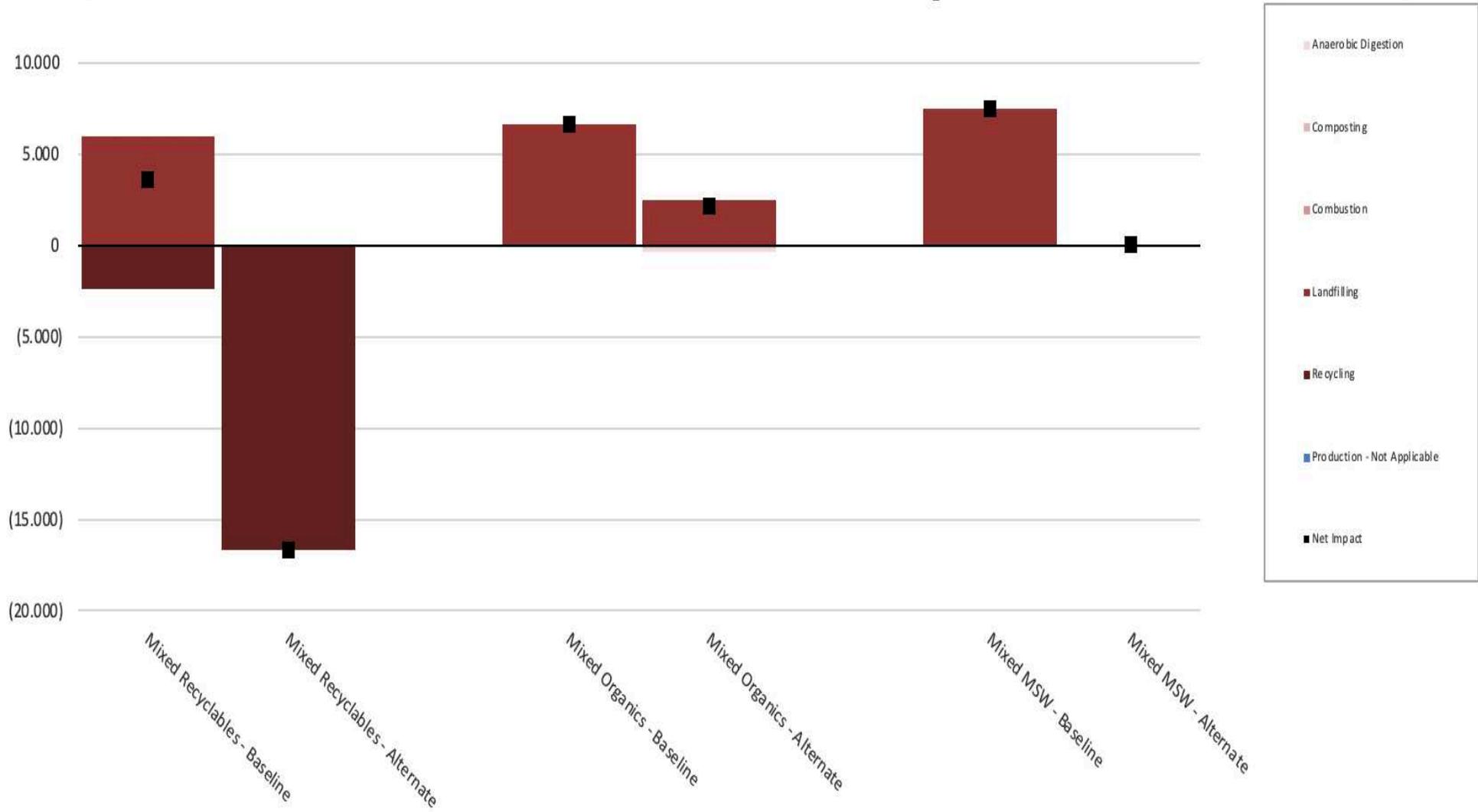
Os resultados de estimativa de emissões de GEE reportados pelo WARM para o cenário de incremento de digestão anaeróbica para o tratamento de RSU orgânicos no município (Cenário 3) indicaram uma redução de 1.070,71 tCO_{2e}. Esse valor se dá devido à redução das emissões de 554,78 tCO_{2e} em comparação com as 515,93 tCO_{2e} no cenário de base sem a presença da DA.

Para o cenário 4 (combustão) de 30% dos RSU através de WtE observou-se a maior redução em relação ao aterramento. Para esse cenário foram emitidos 46,72 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente. Dessa forma, o total de

emissões dos GEE para o cenário base atual de gerenciamento dos RSU é de 17.684 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente. Entretanto, considerando os cenários alternativos de gerenciamento, tem-se um total de redução de emissões na casa de 14.482,30 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente. Assim, os cenários alternativos apresentaram um decréscimo para as emissões de GEE na faixa de 32.165,69 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente. Esse resultado apresenta a necessidade de diversificação das práticas de gerenciamento integrado dos RSU no município de Ijuí/RS por meio da expansão da reciclagem, aplicação da compostagem e digestão anaeróbica e, principalmente, da conversão térmica como alternativa para o tratamento dos rejeitos dos RSU visando ao alcance desses ganhos ambientais.

A Figura 22 mostra a variações das emissões para o cenário alternativo de reciclagem dos RSU.

Figura 22 - Resultados de emissões de GEE em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_{2e}) para o desvio de 30% dos RSU para a reciclagem



Fonte: WARM - Versão 15 (2022).

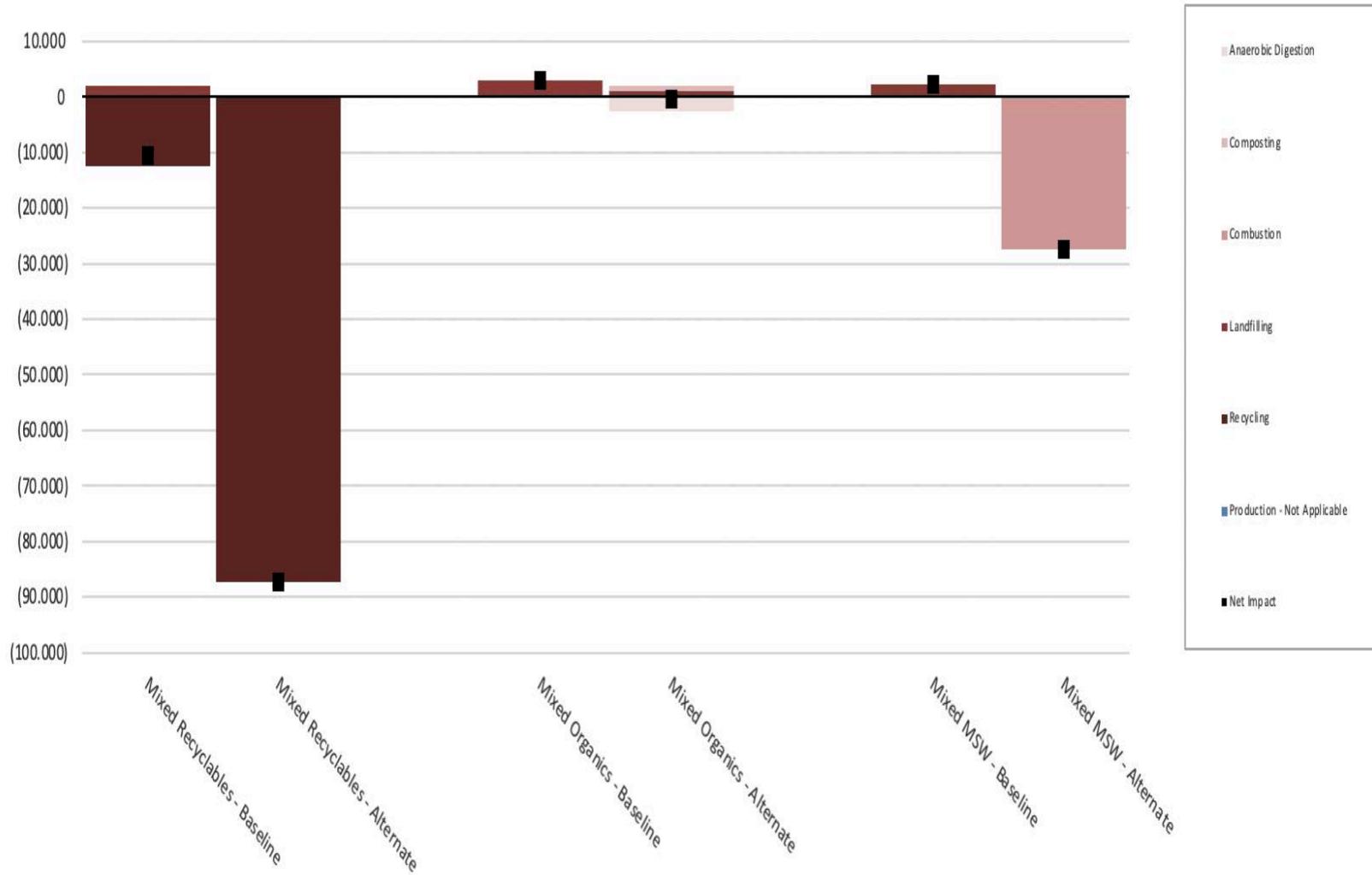
5.4.6. Impactos energéticos

Os impactos energéticos foram verificados para o cenário base e alternativo. Nesse cenário houve uma mudança considerável em relação à economia de energia no cenário de base. O cenário base aponta um valor de consumo de energia necessário para o aterramento dos RSU está na faixa de 7.136,18 milhões de BTU. Já para a reciclagem realizada atualmente no município os dados apontam uma redução de 12.496 milhões de BTU. Esse valor mostra que a reciclagem é o principal elemento para a redução do consumo de energia para produção de novos produtos.

Em relação ao cenário alternativo de expansão da reciclagem no cenário 1 ocorre a maior redução do consumo de energia para novos produtos, esse valor fica na faixa de 87.339,40 milhões de BTU. O cenário 2 aponta o consumo de energia para a compostagem no qual sofre uma redução em relação ao aterramento, no entanto continua tendo um valor positivo. Na análise do cenário 3 observou-se o consumo de energia para a digestão anaeróbica, e uma redução significativa em relação ao aterramento na faixa de 2.515,43 milhões de BTU. O cenário 4 de combustão foi o cenário no qual houve uma maior economia de energia em relação ao aterramento. Nesse cenário onde os resíduos são destinados para a combustão ou recuperação energética, e obteve-se um valor de economia de energia na faixa de 27.575,34 milhões de BTU.

O sistema WARM apresenta o balanço energético em relação ao cenário base na planilha esquerda e em relação aos cenários alternativos na planilha a direita. Nessa análise verifica-se uma redução de energia de 109.994,20 milhões de BTU. Segundo dados do sistema WARM, isso significa o equivalente ao consumo energético anual de aproximadamente 1200 residências, a conservação de 18.932 barris de petróleo e de 913.176 litros de gasolina, conforme Figura 23.

Figura 23 - Análise do consumo de energia para o aumento da reciclagem



Fonte: WARM - Versão 15 (2022).

5.4.7. Impactos econômicos

O sistema WARM apresenta os impactos econômicos em horas de trabalho para as diferentes estratégias de gestão de resíduos. Verificou-se que no cenário de expansão da reciclagem (cenário 1) houve um aumento de aproximadamente 29.824 horas de trabalho necessárias para a gestão e destinação de 30% dos RSU para a reciclagem. Da mesma forma, ocorreu o aumento dos impostos gerados na expansão do programa de reciclagem de US\$ 121.244,67, passando dos US\$ 333.069,60 dólares de imposto no cenário de aterramento (cenário base) para US\$ 454.314,27 no cenário onde ocorre a expansão da reciclagem, compostagem, DA e combustão (cenários 1,2,3 e 4).

Para complementar a análise dos dados de impactos econômicos foram utilizados indicadores do SNIS com referência às despesas aplicadas ao manejo de resíduos sólidos no Brasil no ano de 2021.

As despesas relacionadas à coleta de RSD e públicos, bem como dos resíduos de serviços de saúde, varrição de logradouros e vias públicas, foram obtidos juntamente à pasta de meio ambiente de Ijuí/RS. O transbordo e destinação final incluem despesas como as de operação e manutenção de escavadeira hidráulica necessária para o correto transbordo dos resíduos para as carretas responsáveis pela destinação final, e ainda, é necessário frisar a existência de outras despesas fixas administrativas, como manutenção de toda a infraestrutura da unidade de transbordo, energia elétrica, serviço de portaria, além de despesas eventuais necessárias à manutenção do funcionamento pleno deste serviço prestado aos municípios.

Com base nos gastos estimados incorridos em 2021 e dados disponibilizados pela SMMA, as despesas unitárias com serviços de manejo de RSU no ano de 2021 foram de aproximadamente R\$ 6.233.038,12 sendo, o maior custo o da coleta dos RSU com R\$ 3.470.770,43. Transbordo e destinação final em do aterro sanitário tiveram um custo total de R\$ 2.372.073,21. Com base nos gastos estimados incorridos em 2021 e nos dados disponibilizados pela SMMA, o custo unitário do aterramento foi de R\$ 128,00/tonelada, totalizando uma média de R\$ 292,26/tonelada coletada e destinada (SMMA, 2021).

Os recursos aplicados pelo município de Ijuí/RS no sistema de coleta de resíduos domiciliares e públicos, coleta de resíduos de serviço de saúde, varrição de

logradouros e demais serviços como despesas administrativas de aterramento, transbordo, tratamento e destinação final dos RSU ultrapassaram os R\$ 6.233.074,11 milhões, esse valor equivale a uma média de R\$ 6,00 por habitante/mês, totalizando aproximadamente R\$ 74,00 por habitante no ano de 2021 (SMMA 2021; SNIS 2021). Esse valor está abaixo da média nacional identificado como R\$ 10,15 por habitante/mês (ABRELPE, 2021).

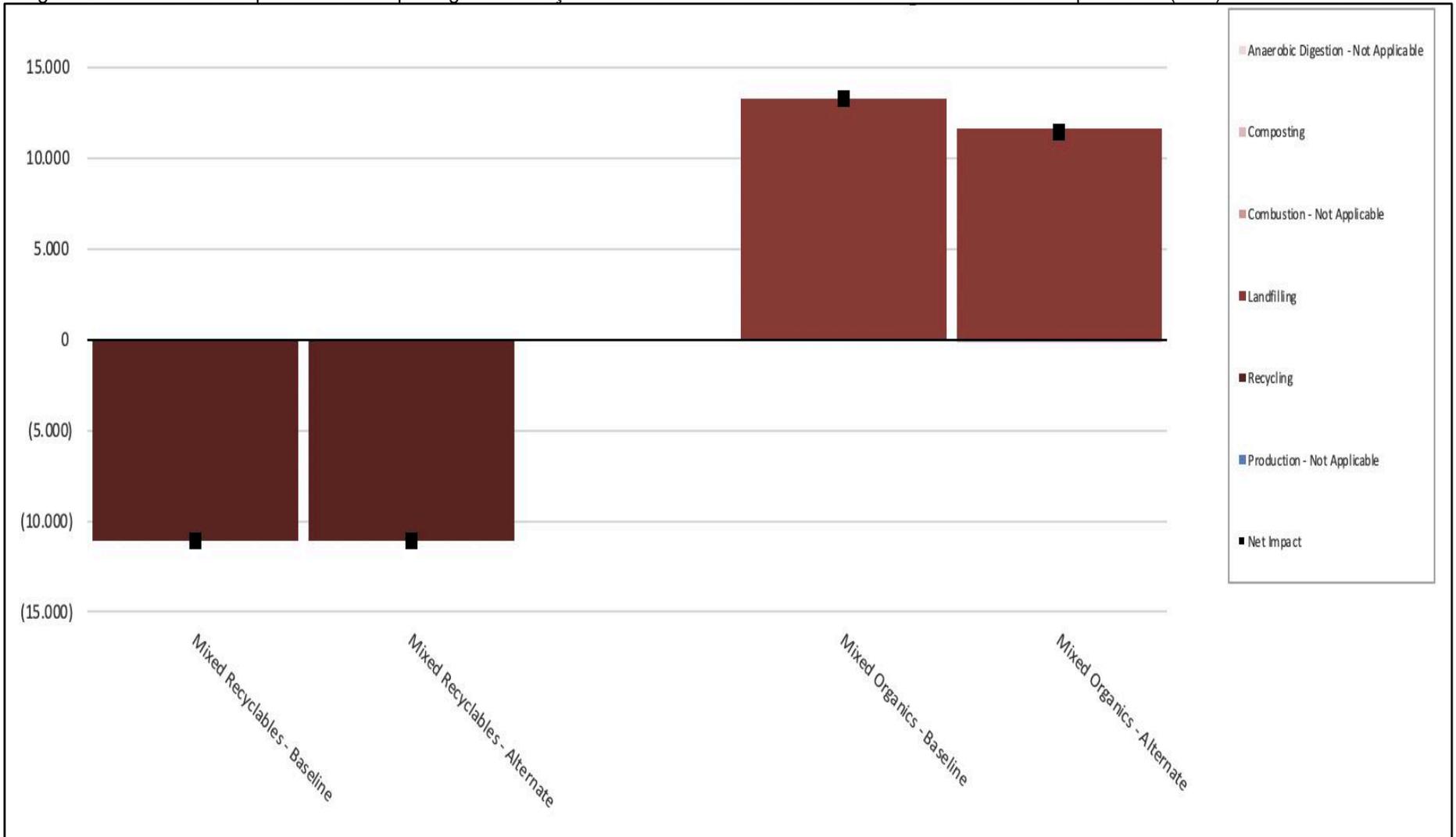
5.4.8. Expansão do programa de reciclagem dos RSU

Os dados do WARM mostram que para a alternativa de expansão de 30% dos materiais recicláveis essa alternativa temos uma redução de 20.673,96 toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂). Esse valor equivale a conservação de emissões de GEE equivalente a 4.389 veículos, 2.326.314 milhões de galões de gasolina e conservação de 861.415 cilindros de propano.

5.4.9. Expansão de programa de compostagem dos RSU

Para o cenário 2, um valor total de 1.945 toneladas configurou a expansão de 10% para compostagem. Para tanto, configurou-se os valores no WARM de forma que se obteve uma redução de 1.828,50 tCO_{2e}.

Figura 24 - Cenário de expansão de compostagem e redução de emissões em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂) e cenários alternativos



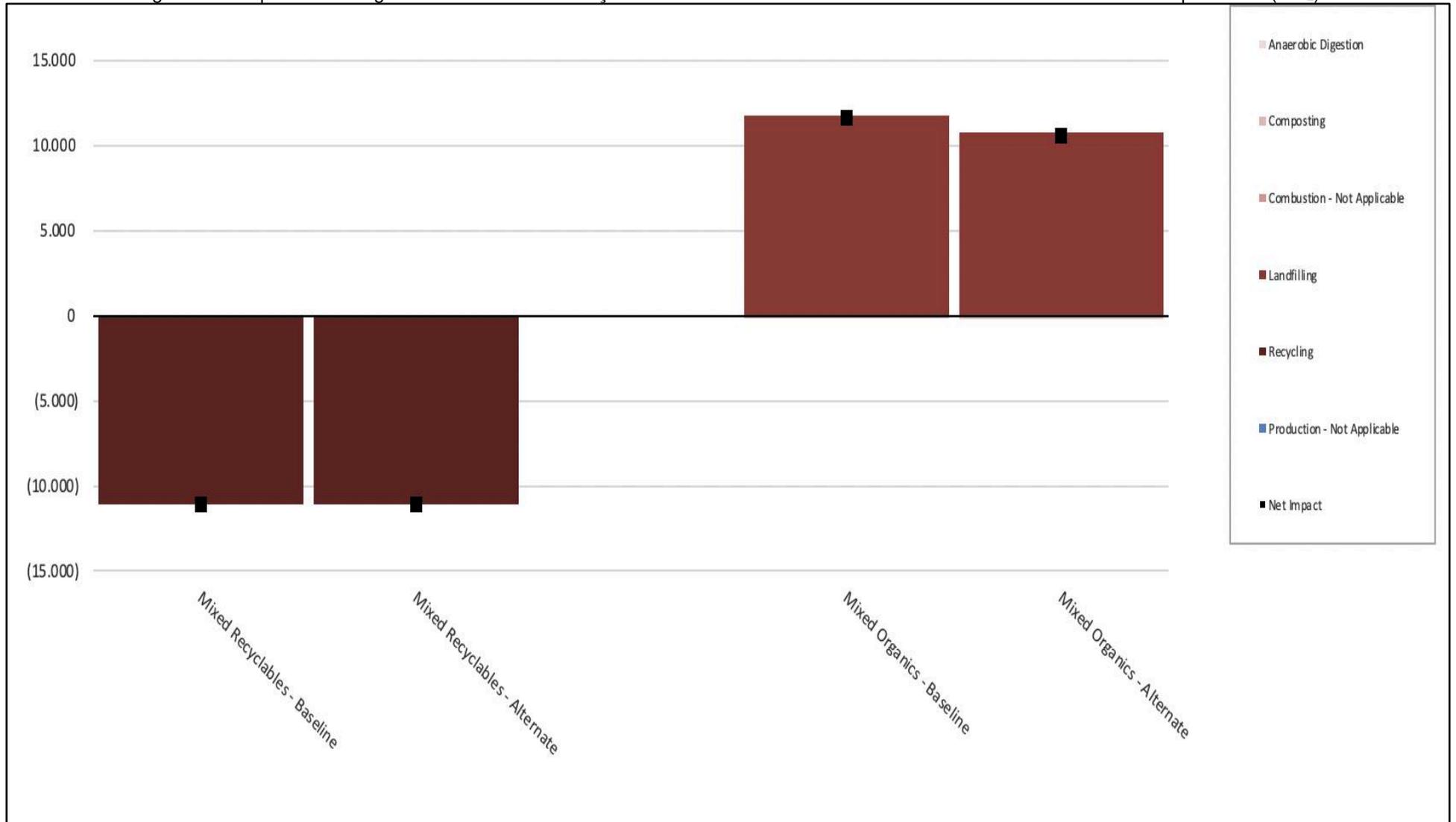
Fonte: WARM - Versão 15 (2022)

5.4.10. Implantação de sistema de biodigestão anaeróbica

De acordo com a USEPA, é extremamente improvável que o RSU misturado seja enviado para a digestão anaeróbica (DA), por isso, essa opção de tratamento só foi incluída na modelagem quando 100% dos resíduos recicláveis são separados na fonte (USEPA, 2019), ou seja 30% no cenário ideal para o município de Ijuí/RS. Conforme mostra a Tabela 6 de cenários, essa situação somente ocorre no cenário 3, onde 30% dos materiais foram encaminhados para a reciclagem, 10% para a compostagem e 15% dos materiais foram destinados para a digestão anaeróbica. Para o cenário 3, um valor de 2.918 toneladas foi calculado para a expansão de DA.

Os resultados de estimativa de emissões de GEE reportados pelo WARM para o cenário de incremento de digestão anaeróbica para o tratamento de RSU orgânicos no município indicaram uma redução de 1.070,71 tCO_{2e}. Esse valor se dá devido à redução das emissões na casa de 554,78 tCO_{2e} em comparação com as 515,93 tCO_{2e} no cenário de base sem a presença da DA. A Figura 25 apresenta a redução das emissões de GEE do cenário alternativo de expansão da digestão anaeróbica.

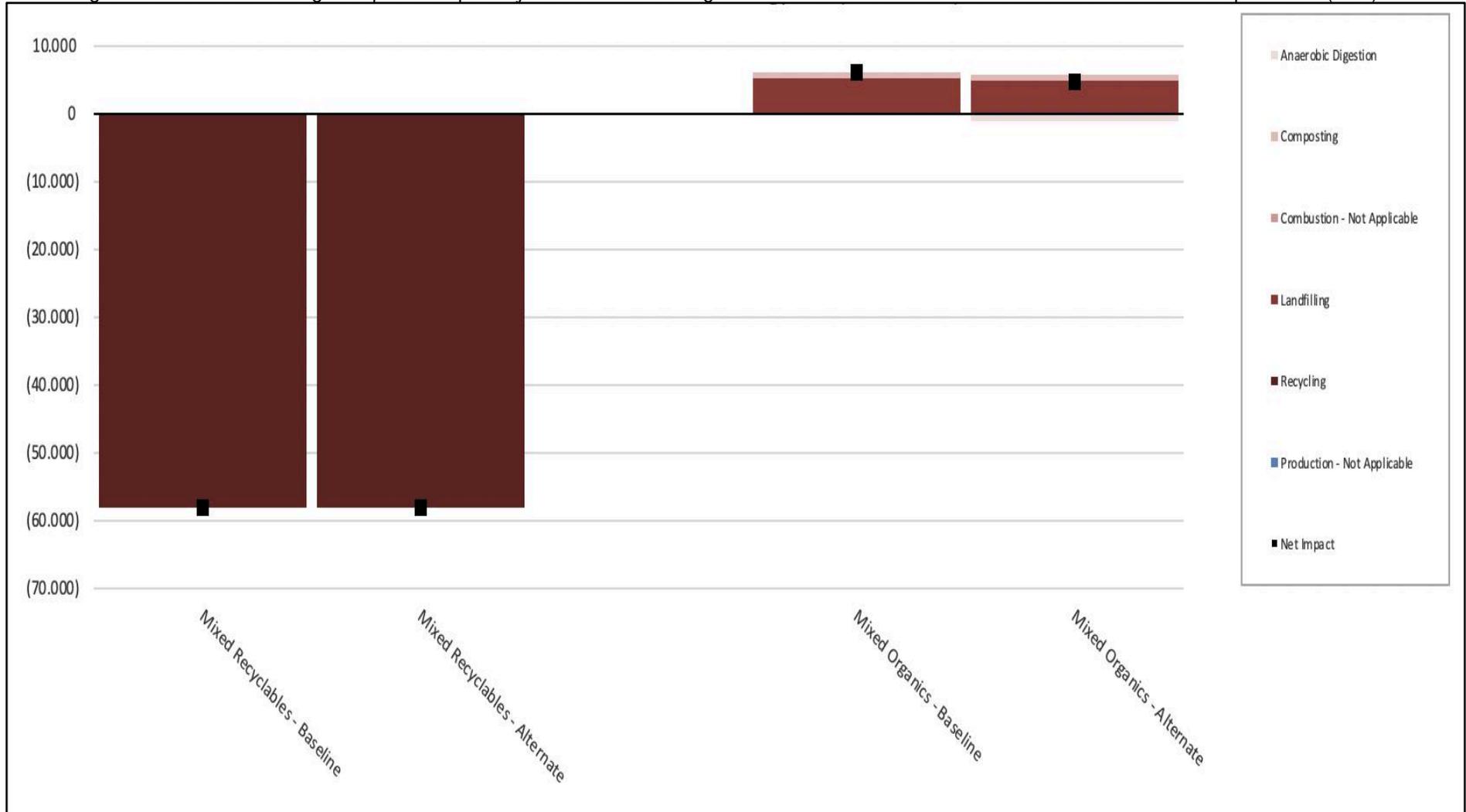
Figura 25 - Expansão da digestão anaeróbica e redução das emissões de GEE em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂)



Fonte: WARM - Versão 15 (2022).

Com relação ao cenário energético os dados do WARM apresentaram uma mudança no uso de energia de forma que se conservaria um valor de 1.453,26 BTU, o equivalente ao consumo anual de 16 residências, 250 barris de petróleo e 12.065 galões americanos de gasolina. A Figura 26 apresenta a expansão do programa de digestão anaeróbica e a redução do consumo energético.

Figura 26 - Consumo energético para a implantação de sistema de digestão anaeróbica em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂)



Fonte: WARM - Versão 15 (2022).

5.4.11. Recuperação energética dos rejeitos - Combustão

No cenário 4 foi prevista a recuperação energética, onde 5.836 toneladas seriam encaminhadas para a RE, representando uma redução de aproximadamente 80% na quantidade de RSU aterrado. Como forma de tratamento alternativo, considerou-se a combustão de 30% dos RSU do município em estudo (UE, 2019; USEPA, 2018; BRASIL, 2022).

Os resultados para a recuperação energética dos resíduos foram representados no cenário 4. A Tabela 13 mostra os valores em toneladas e as respectivas porcentagens da expansão da reciclagem em 30%, compostagem 10%; digestão anaeróbica 15%, chegando a 45% de resíduos sendo destinados para a combustão. Esse cenário alternativo representa uma redução de 100% do aterramento de RSU.

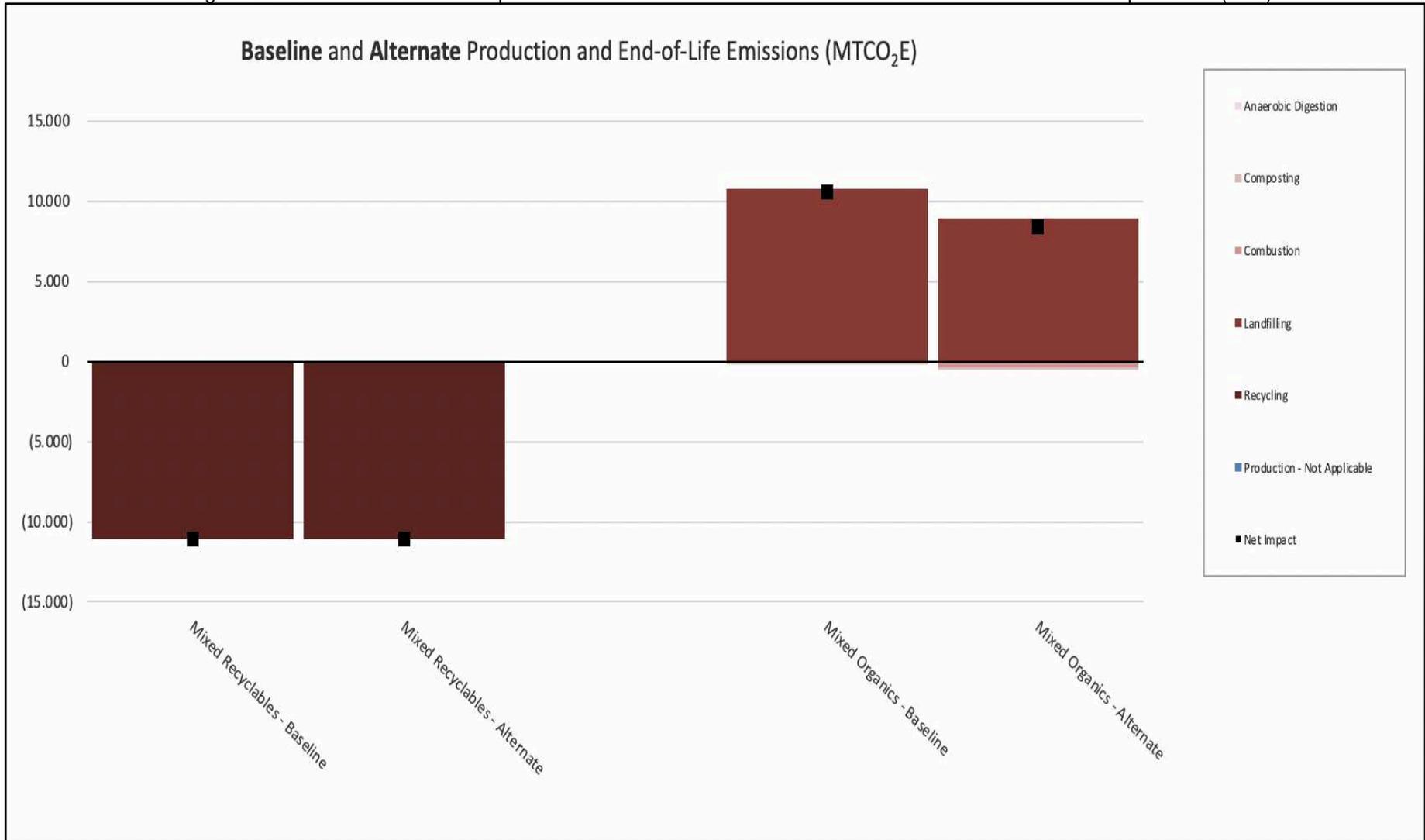
Tabela 13 - Configuração do fluxo de RSU

Material	Reciclados (t)	Compostado (t)	DA (t)	RE (t)	Aterrado (t)
Mix de recicláveis	5.836 (30%)		2.918 (15%)		
Mix orgânicos		1.945 (10%)		5.836 (30%)	2.920 (15%)

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A análise das emissões de GEE em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_{2e}) teve uma redução de 2.146,76 tCO_{2e}. Importante destacar que nesse cenário foram evitadas emissões equivalentes a 456 veículos de passeio, conservando-se, assim, 241.561 galões americanos de gasolina e 89.448 cilindros de propano. Esses resultados podem ser visualizados na Figura 27.

Figura 27 - Análise das emissões para o cenário de combustão em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂)

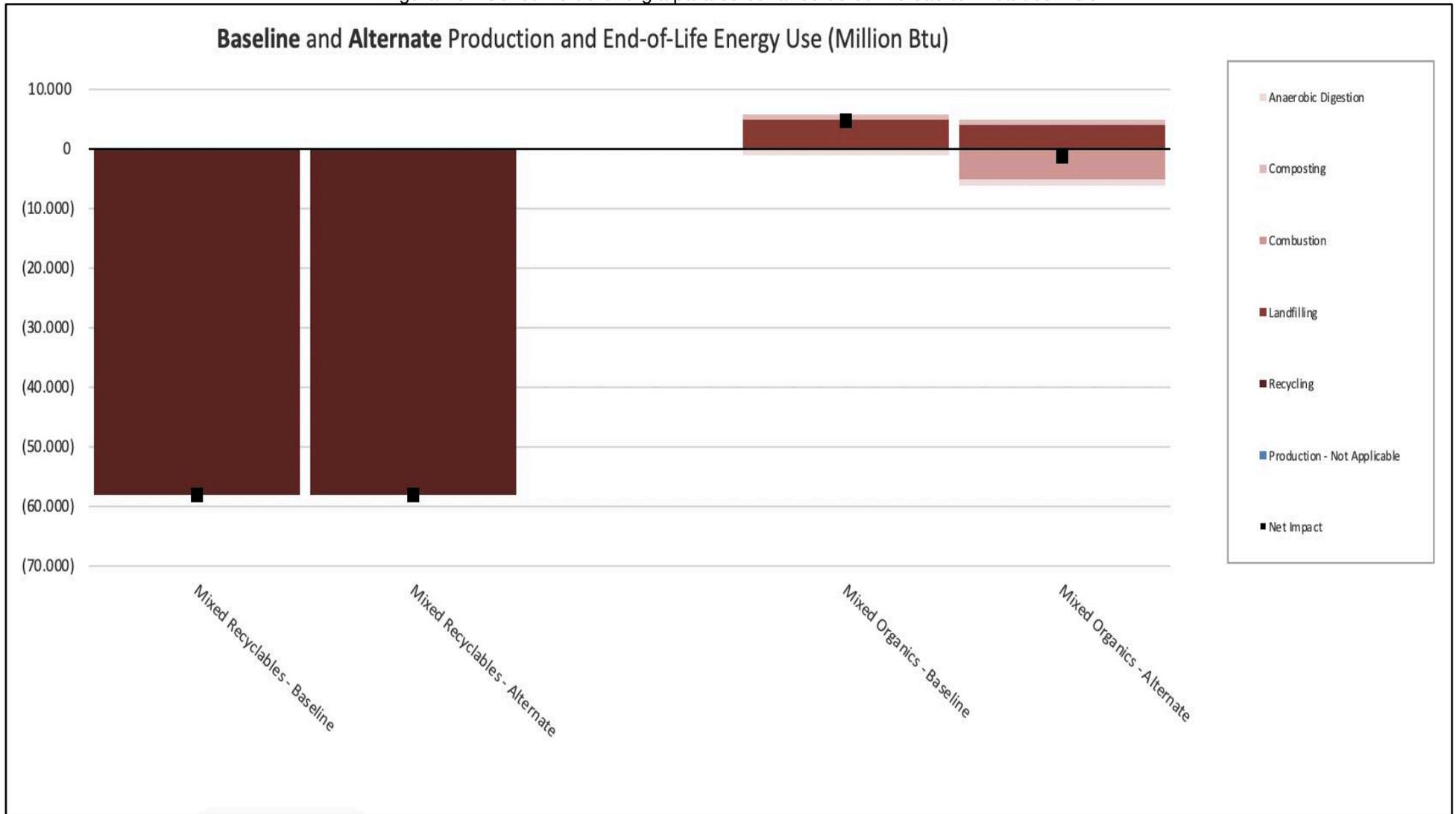


Fonte: WARM - Versão 15 (2022).

Observou-se uma redução de 6.034,09 BTU na Figura 26, essa redução pode ser atribuída, principalmente, ao ganho energético que se pode obter em relação à redução de emissões da destinação pelo aterramento por meio da combustão dos rejeitos de RSU. Isso mostra que a combustão dos RSU é a opção mais favorável para a destinação dos RSU em face ao aterramento e às demais analisadas.

A mudança energética representa a conservação de 66 casas residenciais, conservação de 1.039 barris de petróleo e 50.095 galões de gasolina. A Figura 28 apresenta as mudanças energéticas no cenário base para a recuperação energética via combustão (cenário 4).

Figura 28 - Consumo de energia para os cenários de conversão térmica dos RSU



Fonte: WARM - Versão 15 (2022)

5.4.12. Redução e desvio dos RSU do aterro sanitário - Cenário 5 – ideal, lixo zero

Por fim, o cenário 5 representa o cenário “lixo zero” onde todos os resíduos são destinados por diferentes estratégias de gestão dos RSU. Para esse cenário temos 5.836 toneladas sendo recicladas, 1.945 toneladas compostadas, 2.918 toneladas sejam encaminhadas para a DA e 8.856 toneladas encaminhadas para a recuperação energética.

O cenário 5 vislumbrado o "lixo zero" para a gestão sustentável dos RSU do município de Ijuí/RS propõe que uma média de 30% dos resíduos gerados sejam destinados para a reciclagem, 10% para a compostagem, 11% para a digestão anaeróbica e 45% encaminhados para a recuperação energética, chegando-se a uma taxa de aterramento de 0% (Tabela 14).

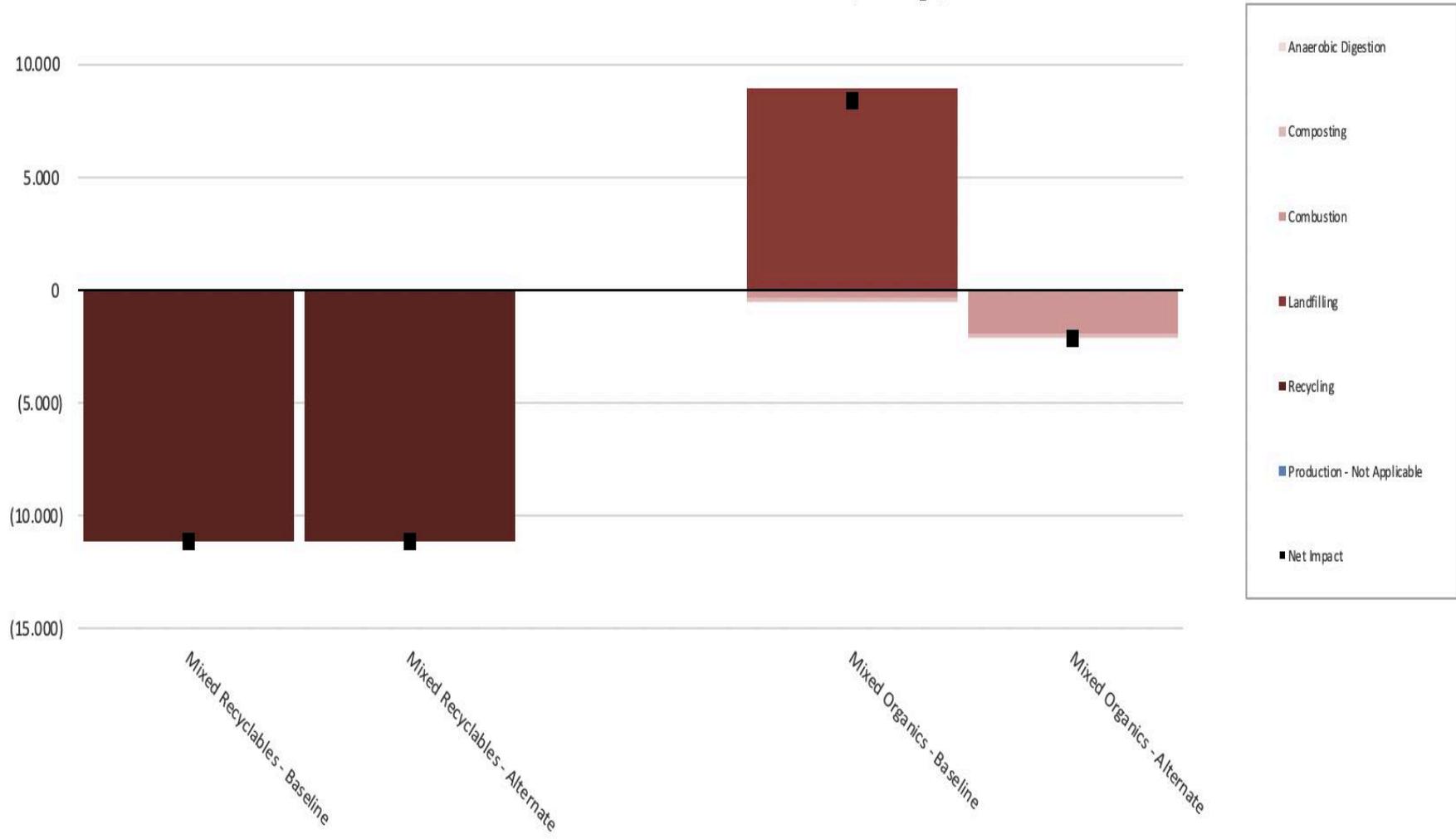
Tabela 14 - Valores de gestão de resíduos para o cenário 5 - "lixo zero"

Material	Reciclados (t)	Compostado (t)	DA (t)	RE (t)	Aterrado (t)
Mix de recicláveis	5.836 (30%)				
Mix orgânicos		1.945 (10%)	2918 (15%)	8.856 (45%)	0.0000 (0%)

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os resultados do WARM na análise das emissões de GEE indicaram uma redução de 10.538,16 tCO_{2e} para esse cenário, equivalentes a 2.237 veículos de passeio, conservando-se, assim, 1.185.795,00 galões de gasolina e 439.090,00 cilindros de propano. Isso equivale a 0,00059% das emissões anuais de CO₂ do setor de transporte americano e 0,00058% as emissões anuais do setor de eletricidade (conforme Figura 29).

Figura 29 - Redução das emissões atmosféricas de GEE em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂) para o cenário 5 - "lixo zero"

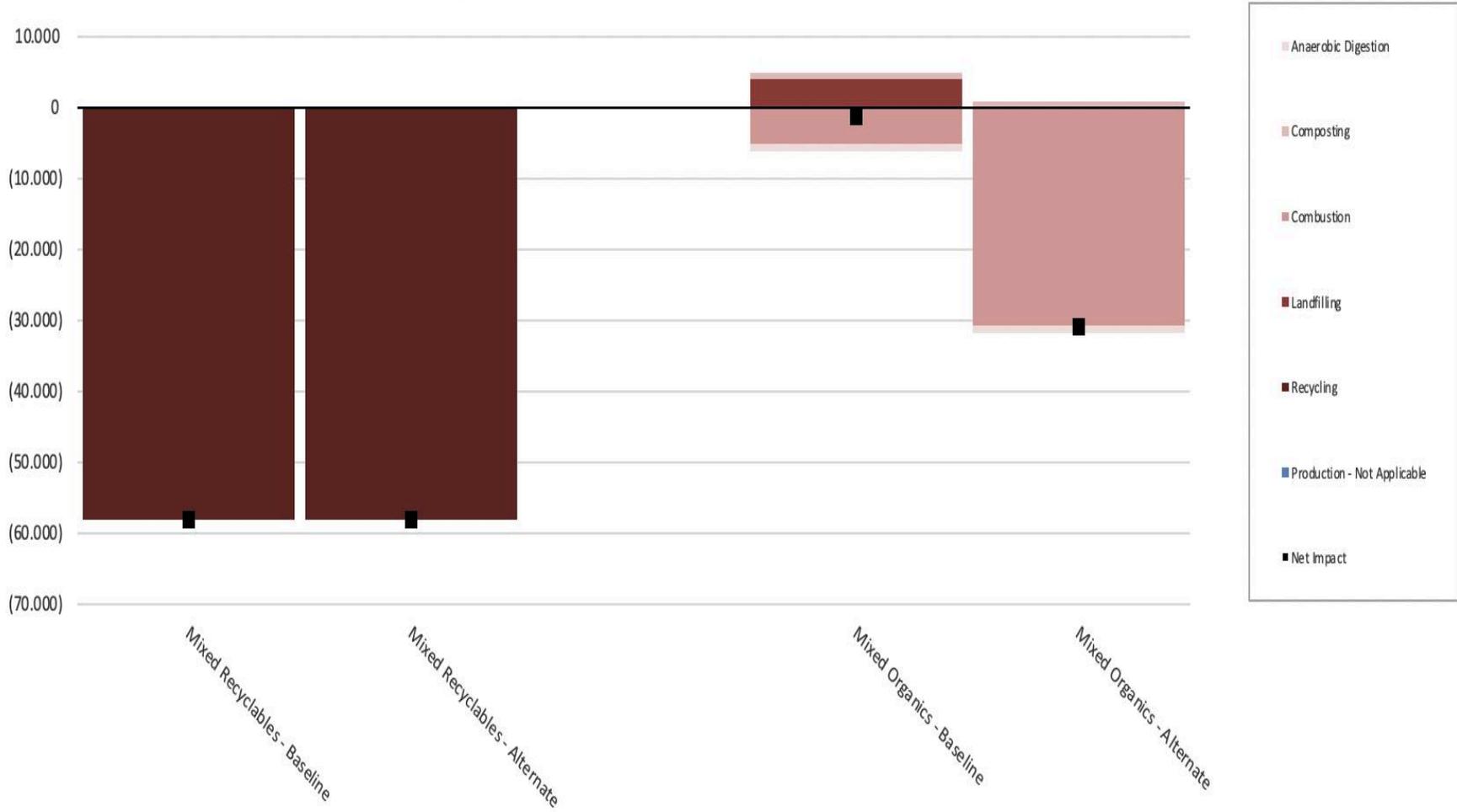


Fonte: WARM - Versão 15 (2022)

Para a análise energética, observou-se uma redução de 29.620,63 BTU. Tal como indicado para os cenários no qual a recuperação energética foi incluída (cenários 4 e 5), essa redução pode ser atribuída, principalmente, ao ganho energético que se pode obter em relação à redução de emissões da destinação dos RSU.

A mudança energética representaria a conservação de 323 casas residenciais, conservação de 5.098 barris de petróleo e 245.912 galões de gasolina. A Figura 30 apresenta as mudanças energéticas com relação ao cenário base para a recuperação energética via combustão.

Figura 30 - Economia de energia em BTU para o cenário 5 - "lixo zero"



Fonte: WARM - Versão 15 (2022).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo mostrou que a implementação de estratégias alternativas de desvio de resíduos do aterramento pode melhorar o atual programa de gerenciamento de RSU do município de Ijuí/RS. Seus resultados podem ser utilizados pelos tomadores de decisão na identificação de alternativas, ou combinação de alternativas, que podem melhorar os programas de destinação final de resíduos no município. A experiência internacional (União Europeia, Estados Unidos, China, Índia, entre outros) indica que resíduos sólidos podem ser utilizados na produção de energia. Esses países incluíram a recuperação energética como prioritária no tratamento desses resíduos que, além de obterem uma destinação sustentável, contribuem para a geração de energia elétrica limpa, renovável, atribuindo maior confiabilidade e estabilidade ao sistema elétrico.

Com base em todos os pressupostos apresentados neste trabalho, torna-se relevante que sejam instituídos mecanismos de políticas públicas que possam promover a implementação da recuperação energética de resíduos. A adoção de uma GSIR, as alterações na PNRS e a aprovação do marco legal do saneamento básico, trouxeram, juntamente com outras regulamentações recentes, novos incentivos jurídicos e procedimentos regulatórios para a recuperação energética de resíduos.

As ações de aproveitamento energético do RSU são excelentes alternativas tanto para o processo de gerenciamento no contexto do saneamento básico, como para a produção energética. Essa alternativa poderá evoluir para uma nova cadeia de produção dentro da área de RSU, agregando valor à cadeia produtiva e gerando empregos e renda. Muda-se de uma ideia conservadora de armazenamento de rejeitos em aterros para um aproveitamento mais nobre, com geração de energia renovável.

De acordo com o cenário atual, apenas 4,4% dos RSU do município são destinados à reciclagem. Resultados do sistema WARM demonstraram que isso contribui com a redução da emissão de 1.577 milhões de toneladas de CO₂ equivalente. Ressalta-se que há um potencial de expansão de reciclagem para aproximadamente de 54% no município de Ijuí/RS de acordo com a análise gravimétrica realizada neste estudo. Esse valor indica que uma grande quantidade de materiais passíveis de reciclagem não estão sendo recuperados na etapa de triagem

realizada nas associações, mostrando a necessidade de melhorar o sistema de triagem.

No ano 2021 o município de Ijuí/RS emitiu o equivalente a 23.824,91 milhões de toneladas CO₂ equivalente na atmosfera com o processo de coleta transporte e destinação final dos RSU em aterro sanitário sem captura e aproveitamento do biogás. Os resultados apresentados no WARM permitiram relacionar o impacto energético do ciclo de vida dos materiais para diferentes cenários de gerenciamento. Ao se relacionar a energia consumida no descarte em aterros com a reciclagem dos materiais, observou-se um ganho de energia por tonelada no processo de reciclagem dos materiais, indicando que a reciclagem é a melhor forma de evitar emissões atmosféricas de GEE.

A amostragem dos resíduos a partir da composição gravimetria demonstrou que a matéria orgânica é a principal fração encontrada nos RSD e rejeitos encaminhados para a estação de transbordo municipal. Esses dados mostram a necessidade de expansão e intensificação de mecanismos e processamento de resíduos e ampliação da educação ambiental e da coleta seletiva.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que Ijuí/RS apresenta potencial para melhorar os processos de gestão de RSU, podendo torná-lo mais sustentável e também rentável com o desenvolvimento de CDR e a inclusão da recuperação energética para a destinação final. A gestão adequada de resíduos poderia evitar incêndios como o ocorrido no lixão municipal desativado de Ijuí/RS em janeiro/2022. Esses poderiam ser utilizados como insumos para produção de energia. Destaca-se que essa pesquisa foi o primeiro passo dado no âmbito de Ijuí/RS em busca de tecnologias mais eficientes e adequadas para tratar os resíduos produzidos no município. Recomenda-se como estudos futuro a análise do poder calorífico dos RSU do município e o desenvolvimento de CDR compactado com a mistura de biomassas disponíveis na região a fim de se agregar à recuperação energética de RSU maior fração de bioenergia.

7. REFERÊNCIAS

ABDEL-SHAFY, H. I.; MANSOUR, M. S. M. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 27, p. 1275-1290, 2018.

ABIOGÁS, Associação Brasileira do Biogás e do Biometano. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano**. São Paulo: ABIOGÁS, 2019.

ABRELPE (Brasil), Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**: ABRELPE. 15. ed. São Paulo, 2021. Disponível em www.abrelpe.org.br. Acesso em 17 jul. 2020.

ABRELPE (São Paulo), Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública. **Recomendações para a gestão de resíduos sólidos durante a pandemia de coronavírus (covid-19)**: seguindo orientações internacionais a abrelpe organizou as boas práticas para assegurar uma adequada gestão dos resíduos sólidos. São Paulo, 2020. Disponível em <https://abrelpe.org.br/abrelpe-no-combate-a-covid-19>. Acesso em 07 set. 2020.

ABREN, Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos. **Licenciamento Ambiental Usinas "Waste-to-Energy"**. 6º Webinar, 02/09/2020. Disponível em <https://abren.org.br/2020/08/20/6o-webinar-abren-licenciamento-ambiental-de-usinas-waste-to-energy/>. Acesso em 15 out. 2020.

ANASSTASIA, T. T. et al. Life cycle assessment (LCA) refuse derived fuel (RDF) waste in pusat inovasi agro teknologi (PIAT) Universitas Gadjah Mada as alternative waste management for energy. **Indonesian Journal of Life Cycle Assessment and Sustainability**, 2018.

ANCAT (São Paulo). Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis (org.). **Anuário da reciclagem 2017-2018**. São Paulo: Pragma Soluções Sustentáveis, 2019. Disponível em <https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/2-Anu%C3%A1rio-da-Reciclagem.pdf>. Acesso em 17 set. 2020.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 745 de março de 2019. Altera a Resolução Normativa nº 77, de 18 de agosto de 2004, que estabelece procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 29 nov. 2016. Disponível em https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/24634418/do1-2016-11-29-resolucao-normativa-n-745-de-22-de-novembro-de-2016-24634332. Acesso em 15 out. 2020.

ANSAH, E.; WANG, L.; SHAHBAZI, A. Thermogravimetric and calorimetric characteristics during co-pyrolysis of municipal solid waste components. **Waste Management**, v. 56, p. 196-206, 2016.

APPELS, L. et al. Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4295-4301, 2011.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

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

ARDUSSO, M.; et al. COVID-19 pandemic repercussions on plastic and antiviral polymeric textile causing pollution on beaches and coasts of South America. **Science of The Total Environment**, v. 763, p. 144365, 2021. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720378967BB0705>. Acesso em 10 fev. 2021.

BALAT, M. et al. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems. **Energy Conversion and Management**, v. 50, p. 3147–3157, 2009.

BAREDAR, P. et al. A Review on Enhancement of Biogas Yield by Pre-treatment and addition of Additives. **MATEC Web of Conferences**, v. 62, p. 1-5, 2016.

BASSYOUNI, M. et al. Date palm waste gasification in downdraft gasifier and simulation using ASPEN HYSYS. **Energy Conversion and Management**, v. 88, p. 693-699, 2014.

BEYENE, H. D.; WERKNEH, A. A.; AMBAYE, T. G. Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review. **Renewable Energy Focus**, v. 24, p. 1-11, 2018.

BING, X. et al. Research challenges in municipal solid waste logistics management. **Waste Management**, v. 48, p. 584-592, 2016.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares**. Brasília: MMA, 2022. Disponível em <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf>. Acesso em 12 mai. 2020.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019. Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto nº 7.404, de 2010. **Diário Oficial da União**, 02 maio 2019. Disponível em <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-interministerial-n%C2%BA-274-de-30-de-abril-de-2019-86235505>. Acesso em 07 mai. 2020.

BRASIL, Presidência da República. Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 3 ago. 2010. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em 13 abr. 2020.

BRASIL, Presidência da República. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000 [...]. **Diário Oficial da União**, 16 jul. 2020. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em 15 abr. 2020.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2018**. Brasília: SNS/MDR, 2019. 180 p.: il. Disponível em <http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2018/Diagnostico-SNIS-AE-2018-Capitulo-15.pdf>. Acesso em 12 mai. 2020.

BROWN, R. C. **Thermochemical Processing of Biomass Conversion: Conversion into Fuels, Chemicals and Power**. Chippenham: John Wiley & Sons Ltd, 2011.

BROWN, R. C.; BROWN, T. R. **Biorenewable Resources: Engineering New Products from Agriculture**. 2 ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2014.

BRUNNER, P. H.; RECHBERGER, H. Waste to energy: key element for sustainable waste management. **Waste Management**, v. 37, p. 3-12, 2015.

BURRA, K. G.; GUPTA, A. K. Synergistic effects in steam gasification of combined biomass and plastic waste mixtures. **Applied Energy**, v. 211, p. 230-236, 2018.

CAMPOS, H. K. T. Recycling in Brazil: Challenges and prospects. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 85, p. 130-138, 2014.

CARVALHO, R. Q. et al. **Oportunidades enterradas: geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbano**. Vitória: EDUFES, 2019.

CHEN, D. et al. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. **Waste Management**, v. 34, n. 12, p. 2466-2486, 2014.

COMISSÃO EUROPEIA. **O papel do desperdício de energia na economia circular**. Comunicação da comissão ao parlamento europeu, ao conselho, ao comitê econômico e social europeu e ao comitê das regiões. Bruxelas, 26/01/2017. Disponível em <https://mportal.cor.europa.eu/Handlers/ViewDoc.ashx?pdf=true&doc=COR-2017-01982-00-00-DT-TRA-EN.docx>. Acesso em 22 mai. 2020.

CONSONNI, S; VIGANÒ, F. Waste gasification vs. conventional waste-to-energy: A comparative evaluation of two commercial technologies. **Waste Management**, v. 32, p. 653-666, 2012.

CZAJCZYŃSKA, D. *et al.* Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. **Thermal Science And Engineering Progress**, [S.L.], v. 3, p. 171-197, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsep.2017.06.003>.

DA ROS, C. et al. Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of winery wastewater sludge and wine lees: An integrated approach for sustainable wine production. **Journal of Environmental Management**, v. 203, p. 745-752, 2017.

DAI-PRA, L. B. et al. Avaliação de ciclo de vida (ACV) aplicada à gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros: uma revisão. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, v. 7, p. 353-364, 2018.

DECRETO Nº 11.043, de 13 de abril de 2022. **Diário Oficial da União**. Disponível em <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.043-de-13-de-abril-de-2022-393566799>. Acesso em 10 mai. 2022.

DEUS, R. M. et al. A municipal solid waste indicator for environmental impact: Assessment and identification of best management practices. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, p. 118433, 2020.

DEUS, R. M.; BEZERRA, B. S.; BATTISTELLE, R. A. G. Solid waste indicators and their implications for management practice. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, p. 1129-1144, 2019.

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

DONG, L.; ZHENHONG, Y.; YONGMING, S. Semi-dry mesophilic anaerobic digestion of water sorted organic fraction of municipal solid waste (WS-OFMSW). **Bioresource Technology**, v. 101, n. 8, p. 2722-2728, 2010.

ENGELMANN, P. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Xangri-lá**. Tese (Doutorado), Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Waste Reduction Model (WARM) Tool User's Guide**. 2020. Disponível em https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-12/documents/warm-users-guide_v15_10-29-2020.pdf. Acesso em 10 mai. 2022.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2018**: Ano base 2017. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

EDO, M. et al. The combined effect of plastics and food waste accelerates the thermal decomposition of refuse-derived fuels and fuel blends. **Fuel**, v. 180, p. 424-432, 2016.

FITAMO, T. et al. Co-digestion of food and garden waste with mixed sludge from wastewater treatment in continuously stirred tank reactors. **Bioresource Technology**, v. 206, p. 245-254, 2016.

FLECK, E.; REICHERT, G. A. Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares de Porto Alegre - 2014/2015. **Anais do 10º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental**, Porto Alegre, 2016.

GARRIDO, M.A; et al. Characterization and Production of Fuel Briquettes Made from Biomass and Plastic. **Wastes Energies**, v. 10, n. 850, 2017.

GREENE, K. L.; TONJES, D. J. Quantitative assessments of municipal waste management systems: using different indicators to compare and rank programs in New York State. **Waste Management**, v. 34, n. 4, p. 825–36, 2014.

GUG, J.; CACCIOLA, D.; SOBKOWICZ, M. Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. **Waste Management**, v. 35, p. 283-292, 2015.

HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P. **What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management**. Washington: Word Bank, 2012.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades: Ijuí**. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/ijui/panorama>. Acesso em 01 ago. 2021.

INFIESTA, L. R et al. **Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel**. Journal of Environmental Management, n. 236, p.715-719, 2019.

KOWALSKI, P. R.; KASINA, M.; MICHALIK, M. Metallic Elements Fractionation in Municipal Solid Waste Incineration Residues. **Energy Procedia**, v. 97, p. 31-36, 2016.

KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 69, p. 407-422, 2017.

KYPRIANIDIS, K. G.; SKVARIL, J. **Developments in Combustion Technology**. London: InTechOpen, 2016.

LAI, K. et al. Evaluation of Waste Reduction and Diversion as Alternatives to Landfill Disposal. **Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)**, p. 183-187, 2014.

LAGERKVIST A.; DAHLÉN, L. Methods for household waste composition studies. **Waste Management**, n. 28, p. 1100-1112, 2008.

LEIVA, M. B.; KOUAIE, E. H.; ESKICIOGLU, C. Anaerobic co-digestion of wine/fruit-juice production waste with landfill leachate diluted municipal sludge cake under semi-continuous flow operation. **Waste Management**, v. 34, n. 10, p. 1860-1870, 2014.

LI, Y. et al. Waste incineration industry and development policies in China. **Waste Management**, v. 46, p. 234-241, 2015.

- LI, Y.; PARK, S.Y.; ZHU, J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 821-826, 2011.
- LIMA, J. Z. et al. Assessment of the use of organic composts derived from municipal solid waste for the adsorption of Pb, Zn and Cd. **Journal of Environmental Management**, v. 226, p. 386-399, 2018.
- LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Incineration and recycling for MSW treatment: Case study of Campinas, Brazil. **Sustainable Cities and Society**, v. 35, p. 752-757, 2017.
- LOPES, E. J. et al. Evaluation of energy gain from the segregation of organic materials from municipal solid waste in gasification processes. **Renewable Energy**, v. 116, p. 623-629, 2018.
- LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J. **Biocombustíveis**. v. 1, n. 1, p.174-360, 2012.
- MACHADO, Adilson Geraldo. **Aproveitamento energético dos rejeitos da triagem de resíduos sólidos urbanos combinados com biomassa: uma opção energética para a região sul de Santa Catarina**. 2022. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Energia e Sustentabilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2022. Disponível em: <https://tede.ufsc.br/teses/PGES0042-D.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2023.
- MAHMOUDKHANI, R. et. al. Greenhouse Gases Life Cycle Assessment (GHGLCA) as a decision support tool for municipal solid waste management in Iran. **Journal of Environmental Health Science & Engineering**, v. 12, n. 71, p. 1-7, 2014.
- MALINAUSKAITE J. et al. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. **Energy**, v. 141, p. 2013-2044, 2017.
- MAO, C. et al. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540-555, 2015.
- MARTIN, S. et al. Tensão térmica e taxa de reação em um reator para gaseificação de biomassa do tipo concorrente. **Revista Ceres**, v. 57, n. 2, p. 168-174, 2010.
- MATSAKAS, L. et al. Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 26, p. 69-83, 2017.
- MAYA, D. M. Y. et al. Gasification of Municipal Solid Waste for Power Generation in Brazil, a Review of Available Technologies and Their Environmental Benefits. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 10, p. 249-255, 2016.
- MINISTÉRIO PÚBLICO DO PARANÁ. **Unidades de Triagem e Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos**: apostila para a gestão municipal de resíduos sólidos urbanos. 2. ed. Curitiba: MPPR, 2013.

MISKOLCZI, N.; ANGYAL, A.; BARTHA, L.; VALKAI, I. Fuels by pyrolysis of waste plastics from agricultural and packaging sectors in a pilot scale reactor. **Fuel Processing Technology**, v. 90, n. 7-8, p. 1032-1040, 2009.

MOODY, L. et al. Use of Biochemical Methane Potential (BMP) Assays for Predicting and Enhancing Anaerobic Digester Performance. **Agricultural Engineering 44th Croatian & 4th International Symposium on Agriculture**, p. 930-934, 2009.

MORAIS, M. S. de; PROTÁSIO, J. R.; VENTURA, K. S. Análise da Gestão de Resíduos Sólidos Durante a Pandemia da Covid-19 em Países da América do Sul. **Anais do I Congresso Latino-Americano de Desenvolvimento Sustentável**. Online, 2021.

MOYA, D. et al. Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies. **Energy Procedia**, v. 134, p. 286-295, 2017.

MUNICÍPIO DE IJUÍ. **Ijuí Lixo Zero**. Aplicativo. s.d. Disponível em <https://lixozero.ijui.rs.gov.br/home>. Acesso em 14 mar. 2023.

MUNICÍPIO DE IJUÍ. **Lei Complementar nº 6.742, de 31 de dezembro de 2018**. Estabelece o Código Tributário do Município, consolida a Legislação Tributária e dá outras providências. Disponível em <https://leismunicipais.com.br/a1/codigo-tributario-ijui-rs>. Acesso em 28 set. 2021.

MUNICÍPIO DE IJUÍ. **Projeto básico: Coleta de Resíduos Sólidos Domiciliares e Recicláveis**. Edital de Licitação, Modalidade Concorrência, 2020. Disponível em <https://portal.tce.rs.gov.br>. Acesso em 01 ago. 2021.

MUNICÍPIO DE IJUÍ. **Revisão do PLAMSAB do Município de Ijuí e elaboração do PMGIRS**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), 2018.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em 15 jul. 2021.

NAÇÕES UNIDAS. Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável: Rio +20. **Declaração final: O futuro que queremos**. Brasil, 2012.

NIZAMIA, A. S. et al. An Argument for Developing Waste-to-Energy Technologies in Saudi Arabia. **Chemical Engineering Transactions**, v. 45, p. 337-342, 2015.

NOUVION, P. **Sistema de Gestão de Resíduos Resiliente para superar a próxima crise**. Fornecedores Europeus de Resíduos para Tecnologia energética – ESWET, 2020. Disponível em <http://www.eswet.eu/press-articles.html>. Acesso em 15 jun. 2020.

OLIVEIRA, A. L. A. R. **Avaliação do ciclo de vida aplicada na gestão dos RSU: Estudo de caso do Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

OUDA, O. K. M.; RAZA, S. A. Waste-to-Energy: Solution for Municipal Solid Waste Challenges - Global Perspective. **Anais of International Symposium on Technology Management and Emerging**, Bandung, 2014.

PANDEY, B. K. et al. Municipal solid waste to energy conversion methodology as physical, thermal, and biological methods. **Current Science Perspectives**, v. 2, n. 2, p. 39-44, 2016.

PELLERA, F. M.; GIDARAKOS, E. Anaerobic digestion of solid agroindustrial waste in semi-continuous mode: Evaluation of mono-digestion and co-digestion systems. **Waste Management**, v. 68, p. 103-119, 2017.

PERROT, J.-F.; SUBIANTORO, A. Municipal Waste Management Strategy Review and Waste-to-Energy Potentials in New Zealand. **Sustainability**, v. 10, p. 3114, 2018.

MUNICÍPIO DE IJUÍ. **Revisão do PLAMSAB do Município de Ijuí e elaboração do PMGIRS**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), 2018.

POMA, C.; VERDA, V.; CONSONNI, S., Design and performance evaluation of a waste-to energy plant integrated with a combined cycle, **Energy**, v. 35, p. 786-793, 2010.

RIO GRANDE DO SUL, Governo do Estado. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul - PERS-RS: 2015-2034**. Porto Alegre, 2014.

SALEMA, D. **Co-combustão de biomassa e carvão em leito fluidizado: Impactos nas emissões atmosféricas de NOx, SO2, CO, Dioxinas e Furanos e Material particulado**. Dissertação (Mestrado), Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2008.

SANTOS, E. L. B. dos. et. al. Práticas domiciliares de gerenciamento de resíduos sólidos em Mossoró, Nordeste do Brasil: um estudo de caso em tempos de pandemia. **Terr@Plural**, Ponta Grossa, v. 16, p. 1-10, 2022.

SANSANIWAL, S. K. et al. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 363-384, 2017.

SHEHZAD, A.; BASHIR, M. J. K.; SETHUPATHI S. System analysis for synthesis gas (syngas) production in Pakistan from municipal solid waste gasification using a circulating fluidized bed gasifier. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 1302-1311, 2016.

SHI, H. et al. Characterization, thermochemical conversion studies, and heating value modeling of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 48, p. 34-47, 2016.

SHONHIWA, C. An assessment of biomass residue sustainably available for thermochemical conversion to energy in Zimbabwe. **Biomass and Bioenergy**, v. 52, p. 131-138, 2013.

SILVA FILHO, V. F. et al. Evaluation of gaseous emissions from thermal conversion of a mixture of solid municipal waste and wood chips in a pilot-scale heat generator. **Renewable Energy**, v. 141, p. 402-410, 2019.

SMMA, Secretaria Municipal do Meio Ambiente. Prefeitura de Ijuí. 2021.

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2018**. Ministério do Desenvolvimento Regional, Secretaria Nacional de Saneamento, Brasília, DF, 2019.

SOARES, E.L.S.F. **Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SOMORIN, T. O.; ADESOLA, S.; KOLAWOLE, A. State-Level assessment of the waste-to-energy potential (via incineration) of municipal solid wastes in Nigeria. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 804-815, 2017.

SOMPLAK, R. et al. Logistic model-based tool for policy-making towards sustainable waste management. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 16, n. 17, 2014.

SONG, J.; SUN, Y.; JIN, L. PESTEL analysis of the development of the waste-to-energy incineration industry in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 276-289, 2017.

SOUZA, A. R. et al. Análise do potencial de aproveitamento energético de biogás de aterro e simulação de emissões de gases do efeito estufa em diferentes cenários de gestão de resíduos sólidos urbanos em Varginha (MG). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 5, p. 887-896, 2019.

SRIVASTAVA, T. Renewable Energy (Gasification). **Advance in Electronic and Electric Engineering**, v. 3, n. 9, p. 1243-1250, 2013.

TANIGAWA, S. **Fact Sheet Biogas: Converting Waste to Energy**. 2017. Disponível em <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-biogasconverting-waste-to-energy>. Acesso em 15 jul. 2021.

THEMELIS, N. J. et al. **Guia para recuperar energia e materiais (REM) de resíduos sólidos**. Vitória: WtErt-Brasil, 2016. Disponível em <https://tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2016/07/Guia-para-a-recupera%C3%A7%C3%A3o-de-energia-e-materiais-a-partir-de-res%C3%ADuos-s%C3%B3lidos.pdf>. Acesso em 17 jul. 2020.

THEMELIS, N. J. et al. **Guidebook para a aplicação de resíduos a tecnologias energéticas na América Latina e Caribe**. Centro de Engenharia da Terra,

Universidade de Columbia. Julho de 2013. Disponível em http://www.seas.columbia.edu/earth/WtErt/files/WTEGuidebook_IDB.pdf. Acesso em 15 mai. 2020.

THEMELIS, Nickolas J.. **GUIA PARA A RECUPERAÇÃO DE ENERGIA E MATERIALES (REM) A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS**. Vitória Es: Wtert-Brazil, 2016. 228 p.

THEMELIS, N. J. et al. **Recovery of Materials and Energy from Urban Wastes: A volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology**. 2. ed. New York: Springer, 2019.

TISI, Y. S. A. B. **Waste-to-Energy como Forma Ambientalmente Adequada de Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Dissertação (Mestrado), Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2019.

TRIPATHY, P.; PANIGRAHI, C. K.; PANIGRAHI, A. A review on pyrolysis of biomass feedstocks. **Anais of International Conference on Emerging Technological Trends**, Kollam, 2016.

TSAKALOU, C. et al. Characterization and leachability evaluation of medical wastes incineration fly and bottom ashes and their vitrification outgrowths. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, p. 367-376, 2018.

USEPA, U.S. Environmental Protection Agency. **Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Tables and Figures**. December 2018. Disponível em https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018_tables_and_figures_dec_2020_fnl_508.pdf. Acesso em 30 jun. 2021.

USEPA, U.S. Environmental Protection Agency. **Documentation for Greenhouse Gas Emission and Energy Factors Used in the Waste Reduction Model (WARM)**. Version: November 2019. Disponível em https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-12/documents/warm_management_practices_v15_10-29-2020.pdf. Acesso em 4 jul. 2020.

USEPA, U.S. Environmental Protection Agency. **Waste Reduction Model (WARM) Tool: User's Guide**. Version: November 2020. Disponível em https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-12/documents/warm-users-guide_v15_10-29-2020.pdf. Acesso em 4 jul. 2020.

VERGARA, S. E. et. al. Boundaries matter: greenhouse gas emission reductions from alternative waste treatment strategies for California's municipal solid waste. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 57, n. 2011, p. 87-97, 2011.

WEG. **WEG oferece ao mercado solução para geração de energia elétrica com utilização de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)**. 2019. Disponível em <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/weg-oferece-ao->

mercado-solucao-para-geracao-de-energia-eletrica-com-utilizacao-de-residuos-solidos-urbanos-rsu. Acesso em 15 jul. 2021.

WHITICAR, D. M.; RALPH, J. **Waste to Energy: A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices - Final Report**. Burnaby: Stantec Consulting Ltd, 2011.

WILLIAMS, P. T. **Waste Treatment and Disposal**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005.

WU, M.; LIN, C.; ZENG, W. Effect of waste incineration and gasification processes on heavy metal distribution. **Fuel Processing Technology**, v. 125, p. 67-72, 2014.

XIN, X.; MA, Y.; LIU, Y. Electric energy production from food waste: Microbial fuel cells veRSU anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 255, p. 281-287, 2018.

XIONG, Y. et al. Heavy metal speciation in various types of fly ash from municipal solid waste incinerator. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 16, n. 4, p. 608-615, 2014.

YAKUBU, Y. et al. Effects of pH dynamics on solidification/stabilization of municipal solid waste incineration fly ash. **Journal of Environmental Management**, v. 207, p. 243-248, 2018.

ZAGONEL, D. G. **Destinação final dos resíduos sólidos urbanos no estado do Rio Grande do Sul**. Fundação Estadual de Proteção Ambiental, 2019. Disponível em http://gabrielsouza.net/wp-content/uploads/2019/07/Apresentacao_FEPAM_Aterros.pdf. Acesso em 4 jul. 2020.

ZHANG, D. Q.; TAN, S. K.; GERSBERG, R. M. Municipal solid waste management in China: Status, problems and challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 91, p. 1623-1633, 2010.

ZHANG, J. et al. A hybrid biological and thermal waste-to-energy system with heat energy recovery and utilization for solid organic waste treatment. **Energy**, v. 152, p. 214-222, 2018.

ZHANG, L.; LEE, Y. W.; JAHNG, D. Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 8, p. 5048-5059, 2011.