UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ROTAS TECNOLÓGICAS PARA UM MELHOR GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS – ESTUDO DE CASO MUNICÍPIO DE PIRENÓPOLIS/GO

MATHEUS CARVALHO DE MATOS

ORIENTADOR: PAULO CELSO DOS REIS GOMES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL II

BRASÍLIA/DF: SETEMBRO/2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ESTUDO DE CASO – ROTAS TECNOLÓGICAS PARA UM MELHOR GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO MUNICÍPIO DE PIRENÓPOLIS GO

MATHEUS CARVALHO DE MATOS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

_____

Paulo Celso dos Reis Gomes, Ph. D. (Unb/DF)

(ORIENTADOR)

_____

Dr Eduardo Montoya Botero (Unb/DF)

(EXAMINADOR INTERNO)

_____

Dr Eduardo Rocha Dias Santos (MDR/DF)

(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 30 DE SETEMBRO DE 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

MATOS, MATHEUS

Estudo de Caso – Rotas Tecnológicas Para um Melhor Gerenciamento de Resíduos Sólidos na Cidade de Pirenópolis.

68 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2022)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Rotas Tecnológicas 2. Pirenópolis

3. Gerenciamento integrado 4. Resíduos Sólidos Urbanos

I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Matos, M. (2022). **Estudo de Caso – Rotas Tecnológicas Para um Melhor Gerenciamento de Resíduos Sólidos na Cidade de Pirenópolis.** Monografia de Projeto Final, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 68 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: MATHEUS CARVALHO DE MATOS

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: **Estudo de Caso – Rotas Tecnológicas Para um Melhor Gerenciamento de Resíduos Sólidos na Cidade de Pirenópolis**.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2022

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Matheus Carvalho de Matos

Av Belém Brasília, 7C, Vila Planalto

70804-005 – Brasília/DF - Brasil

matheus.carvalhodematos@gmail.com

Dedico esta monografia à minha família.
Em especial aos meus pais Ronny Matos e
Renata Carvalho, meu irmão Marcos Carvalho e
minha companheira Beatriz Zaranza.

“Com grandes poderes vêm grandes responsabilidades”

Stan Lee

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Paulo Celso, pela confiança em aceitar-me como orientando de graduação na UnB.

Ao Eduardo Santos, exemplo de dedicação, profissionalismo, e pelas conversas, prontidão e momentos de aprendizagem no Ministério do Desenvolvimento Regional.

Aos demais colegas do Ministério do Desenvolvimento Regional, em especial ao Luiz Filho, Cássio Bueno, Jean Gasso e Rudybert Von Eye pelos momentos de aprendizagem.

Ao Professor Eduardo Botero e aos demais professores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental que contribuíram de várias maneiras para a minha formação.

Aos amigos que a UnB me trouxe, em especial ao André Estevam pela compreensão e apoio durante a graduação, presente tanto em momentos de descontração, quanto nos estudos.

Aos meus melhores amigos, Alexandre, Bruno, Gabriel, Mateus e Pedro, pelo apoio nas horas difíceis e companheirismo nos melhores momentos da vida. Amo vocês.

Às famílias Carvalho e Matos, com a torcida, carinho e a ajuda de todos vocês, consegui chegar até aqui.

À minha companheira, Beatriz Zaranza, por ficar ao meu lado nas horas mais difíceis, o seu apoio foi fundamental para que eu chegasse até aqui. Te amo

E, principalmente, agradecer a Deus.

RESUMO

A disposição final ambientalmente correta dos resíduos sólidos urbanos é de suma importância para garantir a sustentabilidade e segurança do meio ambiente. A disposição inadequada pode provocar grandes impactos ao meio ambiente, com efeitos adversos sobre as pessoas, o solo, a água e o ar.

Para que seja feita a disposição ambientalmente correta, faz-se necessário, primeiramente, conter e remediar os locais que estão inadequados. Este trabalho tem por objetivo analisar a atual gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos na região de Pirenópolis-GO, para propor oportunidades de melhorias por meio da sugestão de rotas tecnológicas específicas para o município, seguindo os preceitos da Lei Nº 12.305 da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), do Decreto Nº 10.936 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2022), e da Lei Nº 14.026 que atualiza o marco legal do saneamento básico (Brasil, 2020). Será utilizada a Ferramenta de Rotas e Custos (Reichert e Paula, 2021) do Governo Federal e, a partir de dados disponíveis de Gravimetria do município de Pirenópolis, foram desenvolvidas rotas tecnológicas indicadas para o município, para ter uma opção que sirva como subsídio para uma gestão integrada sustentável dos resíduos sólidos.

O município de Pirenópolis, que atualmente conta com um lixão à céu aberto para dispor seus resíduos sólidos urbanos, tem grande potencial para mudar este cenário, e dos 4 cenários modelados, obteve-se como resultado que, para pequenos municípios, é inviável a adoção de destinação final em aterro sanitário considerando apenas sua população.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos, Pirenópolis, Rotas Tecnológicas, Gerenciamento Integrado.

ABSTRACT

The environmentally sound waste is extremely important to ensure the sustainability and safety of the environment. The improper final disposal could cause a major impact on the environment, with adverse effects on people, soil, water, and air.

For the environmentally correct final disposal to be made, it is necessary, first, to contain and remedy the improper places. This work aims to analyze the current management of Urban Solid Waste in the region of Pirenópolis-GO, to propose improvement opportunities for improvement through the suggestion of specific technological routes for the municipality, following the precepts of Law Nº 12.305 of the National Solid Waste Policy (Brazil, 2010), Decree No. 10,936 establishing the National Solid Waste Policy (Brasil, 2022), and Law No. 14,026 updating the legal framework for basic sanitation (Brasil, 2020). The "Ferramenta Rotas e Custos" Tool (Reichert and Paula, 2021) of the Federal Government will be used and, from available gravimetric composition data from the municipality of Pirenópolis, technological routes indicated for the municipality will be developed, to have an option that serves as a subsidy for sustainable integrated management of solid waste.

The municipality of Pirenópolis, which currently has an open dumpsite to dispose of its urban solid waste, has great potential to change this scenario. From the molded scenarios it was obtained as a result that for small cities it is unfeasible to adopt a final destination in a landfill considering only their population.

Key Words: Municipal Solid Waste, Pirenópolis, Technological Approaches, Integrate Management System

Sumário

1. INTRODUÇÃO 1
2. OBJETIVOS 4
2.1. OBJETIVO GERAL 4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 4
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
3.1. RESÍDUOS SÓLIDOS 5
3.1.1. Classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco. 5
3.1.1.1. Resíduos perigosos 6
3.1.1.2. Resíduos não perigosos 6
3.1.2. Classificação dos resíduos sólidos quanto à natureza ou origem. 6
3.1.3. Acondicionamento/Armazenamento dos Resíduos Sólidos 7
3.1.4. Coleta e Transporte de Resíduos Sólidos 8
3.2. TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 9
3.2.1. Triagem e Reciclagem 11
3.2.2. Tratamento Biológico 12
3.2.3. Incineração 13
3.2.4. Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR) 14
3.3. DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS 15
3.3.1. Aterros Sanitários 15
3.4. ROTAS TECNOLÓGICAS 17
3.5. MODELOS DE SIMULAÇÃO 19
3.6. PMGIRS de PIRENÓPOLIS 20
3.7. FERRAMENTA ROTAS TECNOLÓGICAS 23
4. MATERIAIS E MÉTODOS 25
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 29
7. REFERÊNCIAS 54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distância do Centro ao Lixão de Pirenópolis 3
Figura 2 - Área lixão Pirenópolis 3
Figura 3- Principais formas de tratamento de RSU 10
Figura 4 - Centro de Triagem de Resíduos em Cidade Ademar – São Paulo 12
Figura 5 - Unidade de compostagem localizada em Ceilândia - DF 13
Figura 6 - Incinerador de resíduos 14
Figura 7- Aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos. 17
Figura 8 - Aterro sanitário de Brasília DF 17
Figura 9- Rota Tecnológica 18
Figura 10 Rota Tecnológica para Resíduos Sólidos Domiciliares do Distrito Federal – cenário desejável 19
Figura 11- Fluxograma da metodologia 26
Figura 12 - Preenchimento dos dados do município e da geração per capita de RSU 26
Figura 13 - Aba para preenchimento de composição gravimétrica na ferramenta 27
Figura 14 - Triagem e definição do destino dos materiais e rejeitos (ProteGEEr) 27
Figura 15 - Tratamento biológico e destinação do material disponível para tratamento biológico (%) 28
Figura 16 - Tratamento térmico e disposição final 28
Figura 17 - Preenchimento de variáveis avançadas para realização de balanço de massa da Rota Tecnológica 29
Figura 18 - Rota Tecnológica Cenário 1 39
Figura 19 - Rota tecnológica cenário 2 42
Figura 20 - Rota tecnológica cenário 3 46
Figura 21 - Rota Tecnológica Cenário 4 50
Figura 22 - Tabela de Composição Gravimétrica Retirada do PMGIRS 51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resíduos Sólidos Abordados no PMGIRS 2
Tabela 2- Composição Gravimétrica resíduos sólidos comuns em Pirenópolis 21
Tabela 3 - Indicadores de Eficiência da Triagem de Resíduos 30
Tabela 4 - Indicadores de Biodigestão 30
Tabela 5 - Indicadores de Biodigestão e Compostagem 30
Tabela 6 - Indicadores de Compostagem 31
Tabela 7 - Indicadores de Incineração 31
Tabela 8 - Indicadores de Aterro Sanitário 31
Tabela 9 - Indicadores de Potencial Energético em Aterro Sanitário 31
Tabela 10 - Indicadores de Características das Frações dos Resíduos para Incineração e Aterro Sanitário 32
Tabela 11 - Cronograma de coleta Pirenópolis 32
Tabela 12 - Tabela Preenchida na Ferramenta Rotas e Custos 33
Tabela 13- Gravimetria de Resíduos PMGIRS 34
Tabela 14 - Composição Gravimétrica Cenário 1 37
Tabela 15- Subprodutos e rejeitos separados da triagem Cenário 1 38
Tabela 16 - Composição Gravimétrica Cenário 2 40
Tabela 17 - Subprodutos e rejeitos separados da triagem cenário 2 (ton/dia) 41
Tabela 18 - Composição Gravimétrica Cenário 3 43
Tabela 19 - Subprodutos e rejeitos separados da triagem Cenário 3 (ton/dia) 44
Tabela 20 - Resíduos Disponíveis para CDR Cenário 3 45
Tabela 21 - Municípios Microrregião Entorno do DF 47
Tabela 22 - Composição Gravimétrica Cenário 4 48
Tabela 23 - Subprodutos e rejeitos separados da triagem Cenário 4 49
Tabela 24 - Resíduos Disponíveis Para CDR Cenário 4 49
Tabela 25 - Resultados modelagem de cenários 53

LISTA DE ABREVIAÇÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CDR	Combustíveis Derivados de Resíduos
CTRS	Central de Tratamento de Resíduos Sólidos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IRR	Índice de Recuperação de Resíduos
PERS	Plano Estadual de Resíduos Sólidos
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SINIR	Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
TM	Triagem manual

1. INTRODUÇÃO

O município de Pirenópolis, localizado no estado de Goiás - GO, foi fundado com o nome de Minas de Nossa Senhora do Rosário Meia Ponte, pelo português Manoel Rodrigues Tomar em 1727, e em 1980, por consequência de o município ser circundado pela serra dos Pirineus, teve seu nome modificado para Pirenópolis. Sua população no último censo (2010), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, é de 23.006 pessoas e, ainda segundo o IBGE, possui uma área de 2.205,010 km². O município conta com o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos –PMGIRS, instrumento da Política Nacional de Resíduos Sólidos, definido pela Lei Federal nº 12.305/2010, e pela Lei Municipal nº 714/2012 que institui a Política Municipal para os Resíduos Sólidos de Pirenópolis – GO.

O PMGIRS de Pirenópolis, tem sua última versão revisada no ano de 2018, antes da publicação da Lei nº 14.026/2020 que atualiza o marco legal do saneamento básico, atribuindo à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) a competência de ditar as regras sobre o saneamento, a partir de referências de padrões e normas. (Brasil, 2020) Além disso, o PMGIRS tem como objetivo atender à Lei 12.305/2010 de dotar instrumento de orientação para a gestão integrada de resíduos sólidos e foi publicado anteriormente ao Decreto nº 10.936/2022 que regulamenta a Lei 12.305/2010.

Segundo o Decreto 10.936/2022, os planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos deverão indicar medidas saneadoras para passivos ambientais originados, dentre outros, de áreas contaminadas, inclusive lixões e aterros controlados. Além disso, devem abordar também a sustentabilidade econômico-financeira da prestação de serviços de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, assim como quais serão os mecanismos de cobrança desses serviços. (Brasil, 2022)

Segundo o PMGIRS, os resíduos de Pirenópolis foram divididos em resíduos comuns e especiais, que devem ter sua destinação final ambientalmente adequada.

Tabela 1 - Resíduos Sólidos Abordados no PMGIRS

Resíduos Sólidos Abordados no Plano	
Resíduos Comuns	**Resíduos Especiais**
Residenciais	Podas e Aparas - áreas públicas
Comerciais - Pequenos Geradores	Comerciais - grandes geradores
Público - Oriundos de varrição de ruas e de logradouros públicos	Unidades de saúde
Podas e aparas - pequenos volumes	Aeroporto e rodoviária
Construção civil - pequenos volumes Zona Rural	Agrícolas
	Das pedreiras e serrarias
	Frigorífico
	Resíduos da mineração

Fonte: PMIGRS, 2015, p. 6. Adaptado.

De acordo com a Lei 12.305/2010, resíduos comuns são considerados como de responsabilidade operacional do Poder Público Municipal, sendo assim, os seus custos devem ser cobertos a partir de recursos públicos. Além disso, ainda segundo a Lei 12.305/2010, foram instituídos alguns instrumentos e ferramentas para a imposição dos sistemas de logística reversa e da responsabilidade compartilhada, onde as empresas tiveram sua responsabilidade aumentada perante a destinação final dos resíduos sólidos. (Lima e Zanbon, 2017)

Para o correto gerenciamento dos resíduos sólidos comuns gerados em Pirenópolis, houve a necessidade de caracterizar e fazer a análise gravimétrica dos resíduos, o que foi feito na fase de diagnóstico do PMGIRS.

A coleta domiciliar, residencial e comercial de resíduos sólidos no município é feita de forma integral pelo Poder Público Municipal, sem terceirizações, e atende, segundo os dados do SINIR 2019, a 99,4% da população. Os caminhões coletores, compactadores ou não, são de propriedade da prefeitura e, de forma suplementar, são utilizados caminhões contratados. Na

revisão do PMGIRS de 2018, não há existência de coleta seletiva, porém, segundo dados do SINIR de 2019, o município já trabalha com a coleta seletiva de secos.

Os resíduos coletados nos municípios de Pirenópolis são destinados a um lixão à céu aberto, em um terreno de propriedade da prefeitura de Pirenópolis, chamado de Aterro da Prefeitura, e está situado a aproximadamente 10 quilômetros do centro urbano (Figura 1), ocupando uma área aproximada de 200 mil metros quadrados, como observa-se na Figura 2.

Figura 1 - Distância do Centro ao Lixão de Pirenópolis



Fonte: Google Earth

Figura 2 - Área lixão Pirenópolis



Fonte: Google Earth

No ano de 2000, houve a instalação de um aterro sanitário, a partir de recursos financeiros da União. O aterro contou tanto com trincheiras de aterramento, quanto com tanques de tratamento de líquidos percolados, sistema de coleta e transferência de chorume, e sistema de drenagem subterrânea. Não obstante o aterro foi construído, por falta de manutenção e operação inadequada das máquinas, o espaço virou um lixão. (PMGIRS, 2015)

Segundo o PMGIRS, o lixão "recebe resíduos residenciais, comerciais, podas e aparas de áreas públicas, resíduos da construção e demolição, ossadas e carcaças de animais mortos, resíduos públicos e resíduos das fossas coletados por caminhões limpa fossas". Hoje em dia não há impermeabilização do solo e o chorume produzido não é coletado nem tratado. (PMGIRS, 2015)

Para o descarte dos caminhões limpa fossas, foram abertas duas lagoas para os dejetos, porém, sem nenhum tipo de preparo e impermeabilização do solo.

Para a análise de um melhor gerenciamento de resíduos sólidos no município de Pirenópolis, será utilizado a ferramenta de Rotas e Custos para Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), da Cooperação Técnica Brasil-Alemanha e do projeto de Cooperação Para a Proteção do Clima na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos – ProteGEEr. (ProteGEEr, 2021)

Sendo assim, o trabalho será desenvolvido de forma a analisar a gestão de resíduos sólidos atual do município, e fornecer sugestões para que a cidade turística de Pirenópolis tenha condições de realizar corretamente a gestão de seus resíduos sólidos, trazendo benefícios não só para o município, mas para toda a região, tendo em vista que a cidade recebe milhares de turistas anualmente.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Analisar a atual gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos na região de Pirenópolis-GO, para propor oportunidades de melhorias a partir da sugestão de rotas tecnológicas específicas para o município, seguindo os preceitos da legislação vigente.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Extrair informações acerca do gerenciamento de resíduos atual da cidade de Pirenópolis e como é feita cada etapa desde o descarte até a sua destinação final.

- Alimentar o modelo de simulação de Rotas e Custos com os dados obtidos através das informações geradas.
- Elaborar, a partir dos resultados, rotas tecnológicas sugeridas para o município de Pirenópolis.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Paula e Reichert (2018), o que conhecemos hoje em dia como rota tecnológica, é uma evolução do conceito de gerenciamento integrado que, segundo Araújo *et al.* (2001), envolve diversos órgãos da administração pública e da sociedade civil, para lidar com todos os materiais dentro do fluxo de geração de resíduos, como realizar a limpeza urbana, a coleta, o tratamento e a disposição final desses resíduos, de forma ambientalmente correta e economicamente viável, e levando em consideração as características das fontes de produção, tipo e volume dos resíduos.

3.1. RESÍDUOS SÓLIDOS

Conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos, o resíduo sólido é considerado qualquer material, substância, objeto ou bem descartado oriundo de atividades humanas, em sociedade, onde sua destinação final se procede, se propõe proceder ou então está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido. (Brasil, 2010)

Já segundo definição da norma técnica ABNT 10004 (2004), resíduos sólidos são os resíduos nos estados sólido e semissólido, resultado de atividades de origem doméstica, comercial, agrícola, comercial, de saúde, de serviços e de varrição. Além disso, inclui-se os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, e os gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, assim como determinados líquidos que suas particularidades os tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou que exijam para este fim soluções técnica e economicamente inviáveis. (ABNT, p. 1. 2004)

3.1.1. Classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco.

Ainda de acordo com a norma técnica ABNT 10004 (2004), o processo de classificação dos resíduos está relacionado com a identificação da atividade ou do processo de sua origem, assim como de seus constituintes, características, e a comparação destes constituintes com resíduos e substâncias já conhecidos que podem impactar à saúde e o meio ambiente. (ABNT, p. 3. 2004)

Os resíduos podem ser classificados em: resíduos perigosos e não perigosos.

3.1.1.1. Resíduos perigosos

Resíduos classe I – Perigosos: "São aqueles que apresentam características que podem representar risco à saúde pública e/ou ao meio ambiente, ou que apresente inflamabilidade, corrosividade, reatividade toxicidade e/ou patogenicidade. " (ABNT, p. 4-5. 2004)

3.1.1.2. Resíduos não perigosos

São classificados, segundo a ABNT 10004 (2004) em:

- Resíduos classe II – Não perigosos;
- Resíduos classe II A – Não inertes: podem ter propriedades tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Resíduos classe II B – Inertes: resíduos que, ao ter contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, em temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus componentes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, com exceção de cor, turbidez, dureza e sabor.

3.1.2. Classificação dos resíduos sólidos quanto à natureza ou origem.

De acordo com Araújo *et al.* (2001), a origem dos resíduos sólidos é o principal elemento para a sua caracterização. Os diferentes tipos podem ser agrupados nas seguintes classes:

- Lixo doméstico ou residencial;
- Lixo comercial;
- Lixo público;
- Lixo industrial;
- Lixo radioativo;
- Lixo portuário, aeroportuário ou rodoferroviário;
- Lixo agrícola;
- Resíduos de serviços de saúde.

Além disso, a Lei 12.305/2010, classifica os resíduos sólidos quanto a origem como:

a) *resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;*

b) *resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;*

c) *resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas "a" e "b";*

d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas "b", "e", "g", "h" e "j";

e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea "c";

f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;

g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;

h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;

i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;

j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;

k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

3.1.3. Acondicionamento/Armazenamento dos Resíduos Sólidos

De acordo com o IBAM (2001), o acondicionamento de resíduos sólidos significa o preparo para que haja a coleta de forma sanitariamente adequada, compatível com o tipo e a quantidade de resíduos. A coleta e o transporte de lixo têm sua qualidade atrelada ao seu acondicionamento, armazenamento e disposição dos recipientes em locais, dias e horários estabelecidos pelo órgão de limpeza urbana para coleta. Sendo assim, a população tem importante participação nesta operação.

O acondicionamento de resíduos sólidos domiciliares pode evitar acidentes, evitar a proliferação de vetores, minimizar o impacto visual e olfativo, reduzir a heterogeneidade dos resíduos (caso haja coleta seletiva), e facilitar a realização da etapa da coleta. (Araújo, *et al.* 2001) Sendo assim, o resíduo já deve ser acondicionado de forma segregada.

Acondicionar e armazenar os resíduos de forma inadequada, misturando os resíduos, segundo Naime (2010), o lixo torna-se não passível de reciclagem.

Existem diferentes formas de acondicionamento e armazenamento, como:

- Sacos plásticos;
- Bags;
- Contêineres de diferentes tamanhos, de plástico ou de metal;
- Caçambas estacionárias;
- Caçambas *roll-on/roll-off*;
- Caçambas compactadoras.

Já os resíduos especiais como da construção civil, de pilhas e baterias e pneus, devem ter seus acondicionamentos segundo normas, como a ABNT NBR 12235 que se aplica ao armazenamento de resíduos perigosos, e a NBR 11174, que se aplica ao local de armazenamento dos resíduos sólidos não perigosos.

3.1.4. Coleta e Transporte de Resíduos Sólidos

Depois de acondicionado/armazenado, os resíduos sólidos devem ser coletados para que sejam encaminhados, mediante transporte adequado, para uma possível estação de transferência, a um eventual tratamento e à disposição final. A coleta do lixo deve ser feita para evitar problemas de saúde ao qual possa propiciar. A coleta dos lixos domiciliares, de pequenos comércios e estabelecimentos públicos, deve ser efetuada pelo órgão municipal encarregado pela limpeza urbana, podendo até utilizar de recursos próprios da prefeitura para a terceirização de empresas ou então de sistemas mistos, como o aluguel de carros específicos. (Araújo, *et al.* 2001)

De acordo com Jucá, *et al*. (2014), a coleta pode ser feita de forma convencional, onde os resíduos são disponibilizados sem separação prévia, com alta perda de qualidade dos materiais recicláveis e do composto a ser produzido, ou então, de forma diferenciada, quando há uma separação prévia do resíduo feita pelo próprio gerador. (Jucá, *et al*. 2014)

Existem diferentes formas, equipamentos e tecnologias para a etapa de coleta e transporte de resíduos sólidos. Como forma regular de coleta que, segundo Leite (2006), pode ser feita com periodicidade definida, atingindo o maior universo possível, domicílio por domicílio, existe a coleta tradicional porta a porta mista sem distinguir os resíduos, ou então a coleta seletiva, com a distinção de resíduos antes de ser coletado.

Como equipamentos de coleta, pode ser feito de forma automatizada, monitorados de forma inteligente com rota programada, evitando deslocamento desnecessário e reduzindo emissões de CO2, ou então de forma semi-automatizada, com parte do sistema automatizado, além da coleta tradicional manual.

Já como tecnologias, a coleta pode ser feita com o auxílio de sensores como GPS, câmeras e células de carga, juntamente com softwares, para otimizar a coleta, evitar desperdícios, diminuir emissões de gases do efeito estufa e gerar economia financeira para o sistema.

Deverá ser implementada também, segundo o Decreto nº 10.936 de 2022, a coleta seletiva, e deverá ser realizada em conformidade com as determinações dos titulares do serviço público, de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, a partir da segregação prévia dos referidos resíduos, de acordo com sua constituição ou composição. (Brasil, 2022)

3.2. TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O tratamento mais eficaz de resíduos sólidos urbanos é aquele prestado pela própria população, ou seja, quando está empenhada em reduzir a quantidade de lixo, evitando desperdício e reaproveitando os materiais, separando os recicláveis na própria fonte e compostando a fração orgânica na própria residência. Começa aí o tratamento de resíduos sólidos urbanos. (Araújo, *et al*. 2001)

Entende-se por tratamento de RSU, na visão de Jucá *et al.* (2014), como uma série de procedimentos físicos, químicos e biológicos, com o intuito de diminuir a carga poluidora no meio ambiente, reduzir os impactos sanitários negativos do homem e o beneficiamento econômico do resíduo. Na atualidade, existem diversos tipos de tratamentos e disposição final para diferentes resíduos e, no Brasil, a prática de disposição final de RSU mais adotada é em aterros sanitários, mesmo que ainda exista enorme quantidade de aterros controlados e lixões. (Jucá, *et al*. 2014)

Observa-se na Figura 3, as principais formas de tratamento de RSU, assim como seus processos e evoluções, seus principais produtos – matérias primas, e suas inovações tecnológicas.

Figura 3- Principais formas de tratamento de RSU

Sistemas Básicos	Processos	Evolução	Produtos	Inovação
Triagem	Físico	Coleta Seletiva, Tratamento Mecânico-Biológico (TMBI).	Matéria-Prima para Reciclagem e Energia	Recuperação dos resíduos (Waste to Resources-WTRI). Energia derivada dos resíduos (Waste to Energy-WTE)
Tratamento Biológico	Biológico	Biodigestores Anaeróbios, Compostagem	Composto Orgânico e Energia	Agricultura e Energia derivada dos resíduos (Waste to Energy-WTE)
Incineração	Físico-Químico	Tratamento Térmico	Vapor e Energia Elétrica	Energia derivada dos resíduos (Waste to Energy-WTE)
Aterros Sanitários	Físico, Quíimco e Biologico	Reator Anaeróbio, Tratamento da M. Orgânica	Biogás (Energia) e Lixiviado	Energia derivada dos resíduos (Waste to Energy-WTE) e Fertilizantes

Fonte: Jucá *et al*. 2014. Adaptado.

Sendo assim, de forma geral, observa-se 4 sistemas básicos de tratamento e disposição de RSU, que são: triagem, aterros sanitários, tratamentos térmicos e tratamentos biológicos. (Jucá, *et al*. 2014)

Processos mecânicos predominam na triagem de resíduos, processos biológicos podem ocorrer a partir de tratamentos aeróbios e anaeróbios, processos físico-químicos ocorrem a partir da incineração e tratamento térmico, e processos físico-químicos e biológicos ocorrem nos aterros sanitários ao considerá-los como biodigestores. São processos que evoluem ao longo do tempo, como por exemplo, a geração de energia em aterros sanitários ao considerá-los como biodigestores anaeróbios com captação de biogás para geração de energia. (Jucá, *et al*. 2014)

Temos como tecnologias para tratamento e disposição final de RSU a triagem e a reciclagem, o tratamento biológico, a incineração, os aterros sanitários, entre outros.

Será abordado neste trabalho principalmente o aterro sanitário que, segundo Jucá *et al.* (2014), é a tecnologia universal de disposição final de resíduos sólidos urbanos, imprescindível mesmo nos países onde existem outras tecnologias de tratamento, como incineração, compostagem e reciclagem, além de alternativas de rotas tecnológicas que já são utilizadas no Brasil.

Um exemplo de rota utilizada é a compostagem que, segundo Pereira Neto (1990), é um dos processos de reciclagem de resíduos mais antigos utilizados pelo homem, que os princípios estão entre os mais atualizados de acordo com exigências modernas, pois trata-se de um processo comprometido com aspectos ambientais, de saúde pública e com o resgate da cidadania.

Além disso, existem inúmeras alternativas para agregar à rota tecnológica, como triagem e reciclagem, incineração, produção de CDR, entre outras.

3.2.1. Triagem e Reciclagem

Triagem ou dosagem de fluxo, são processos de separação de RSU, e ocorrem posteriormente às etapas de coleta e transporte. Por isso a importância da coleta diferenciada para especificação do tipo de triagem que poderá ser empregada. (Jucá, *et al*. 2014)

A coleta seletiva, no Brasil, é definida pela Lei nº 12.305 de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, como a coleta de resíduos sólidos previamente segregados a partir de sua constituição ou composição, e deve ser estabelecida no plano microrregional de resíduos sólidos com a participação de cooperativas ou outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis formadas por pessoas físicas de baixa renda, sempre que possível. Além disso, sempre que estabelecido o sistema de coleta seletiva, os consumidores devem ser orientados e fiscalizados quanto a acondicionar adequadamente e de forma diferenciada os resíduos sólidos gerados, assim como disponibilizar adequadamente os resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis para coleta ou devolução. (Brasil, 2010)

Após realizada a coleta, os materiais considerados secos podem ser encaminhados para unidades de triagem para a separação de materiais específicos, limpeza, enfardamento e acondicionamento de materiais para posterior comercialização. As unidades de triagem, segundo Araújo *et al*. (2001), são equipadas com mesas de catação, equipamentos de dosagem de fluxo como esteiras transportadoras (conhecidas como chão movediço) e prensas. Os catadores são posicionados ao longo da esteira de catação, separando no início da esteira materiais mais volumosos como papel, papelão e plástico filme, para que os materiais menores possam ser visualizados e separados pelos catadores no final da linha de produção. (Araújo *et al*. 2001)

As unidades de triagem estão na cadeia produtiva da reciclagem dos resíduos entre as etapas de coleta seletiva e a reciclagem propriamente dita. E o objetivo final da instalação de unidades de triagem é a preparação dos materiais para encaminhamento às indústrias de reciclagem. Pode

ser observado um centro de triagem de resíduos altamente automatizado na Cidade Ademar, em São Paulo, na Figura 4.

Figura 4 - Centro de Triagem de Resíduos em Cidade Ademar – São Paulo



Fonte: Prefeitura de São Paulo

3.2.2. Tratamento Biológico

tratamento biológico pode envolver processos de decomposição aeróbia (compostagem), ou anaeróbia (digestão anaeróbia). Segundo a Norma ABNT NBR 13591/1996, a compostagem é o processo de decomposição biológica da fração orgânica biodegradável dos resíduos, efetuado por uma população diversificada de organismos, que estejam em condições controladas de aerobiose e demais parâmetros, desenvolvido em duas etapas distintas, a degradação ativa e a maturação. Pode ser feita de forma descentralizada, em cada residência, ou centralizada, para um sub-conjunto da população de um município. Já a usina de compostagem, é uma instalação dotada de pátio de compostagem e conjunto de equipamentos eletromecânicos destinados a promover e/ou auxiliar o tratamento das frações orgânicas dos resíduos domiciliares. Como complemento, segundo Jucá *et al*. (2014), na unidade de compostagem é necessário também a implementação de instalação de drenagem de líquidos, bem como a canalização do lixiviado que é produzido pelas leiras, estruturas com matéria vegetal de base para receber os resíduos, ao longo do processo de degradação para um sistema de tratamento.

Já segundo Jucá *et al*. (2014), o processo de compostagem envolve primeiramente a fase onde acontecem as reações bioquímicas de oxidação mais intensas, predominantemente termofílicas, onde o aumento da temperatura do sistema pode chegar aos 60ºC, e a segunda fase, chamada de maturação, é o processo de humificação dos materiais orgânicos compostados, que predominam as reações mesofílicas, e em que se encontram temperaturas mais próximas à temperatura ambiente.

O produto final do processo de compostagem é um composto orgânico rico em nutrientes minerais que, segundo Araújo *et al.* (2001), pode ser utilizado na agricultura como recondicionador de solos, com algum potencial fertilizante, e segundo Jucá *et al*. (2014), pode ser usado em praças e jardins municipais, nas escolas e creches do município e na recomposição de áreas degradadas. Na Figura 5, pode ser observado uma vista superior de uma unidade de compostagem localizada em Ceilândia, no Distrito Federal.

Figura 5 - Unidade de compostagem localizada em Ceilândia - DF



Fonte: Valor Ambiental

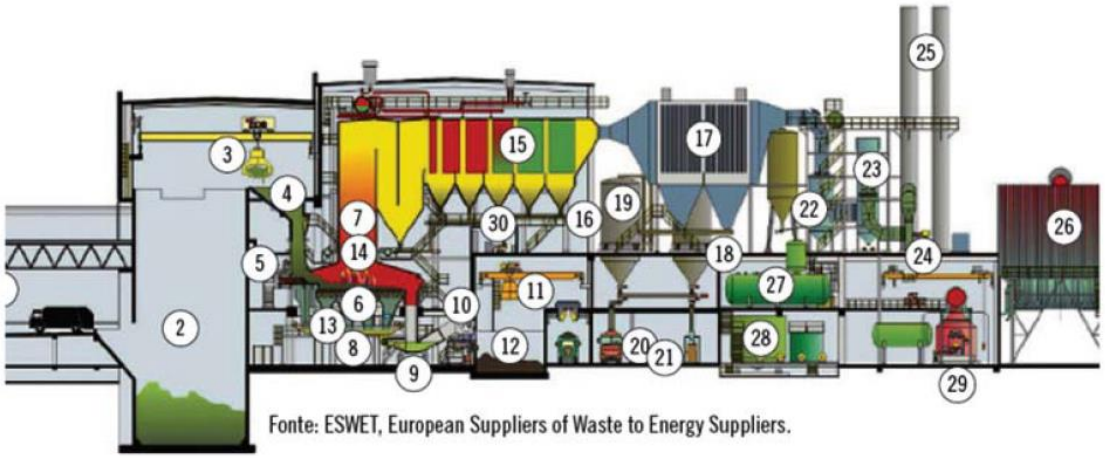
Já o método de tratamento biológico de digestão anaeróbia, ocorre em condições de ausência de oxigênio livre, e a decomposição ocorre em baixa temperatura, geralmente com exalação de fortes odores e leva mais tempo para a estabilização da matéria orgânica. Segundo Jucá *et al.* (2014), ocorre em três fases, sendo elas, a fase ácida, acetogênica e, por último, metanogênica. Além disso, as unidades de digestão anaeróbia podem ser divididas nos estágios de pré tratamento, digestão dos resíduos, recuperação do biogás e tratamento dos resíduos digeridos.

3.2.3. Incineração

Segundo Jucá *et al*. (2014), a incineração insere tratamentos térmicos existentes para o tratamento de resíduos sólidos. E é uma das tecnologias mais antigas existentes. Esta tecnologia tem o objetivo da redução do volume dos resíduos em tratamento térmico de alta temperatura, acima de 800ºC, feita com mistura de ar adequada durante determinado período, posteriormente, os resíduos incinerados são levados a um ambiente oxidante, para serem decompostos em 3 fases: Inerte (cinzas), gasosa e uma quantidade líquida mínima. Os incineradores têm recuperação energética aproximada de 50% a 70% (Jucá *et al*. 2014), de forma que 15 a 25% são energia elétrica, e o restante, energia térmica.

Além disso, na visão de Araújo *et al.* (2001), a incineração torna o resíduo absolutamente inerte em pouco tempo, porém, sua instalação e seu procedimento são, normalmente, dispendiosos, principalmente pois há a necessidade da instalação de filtros e implementos tecnológicos para diminuir ou até eliminar a poluição do ar que é provocada pelo processo. A Figura 6 ilustra uma planta de um incinerador de resíduos sólidos.

Figura 6 - Incinerador de resíduos



Fonte: SESWET, European Suppliers of Waste to Energ Suppliers – ABRELPE, 2012.

3.2.4. Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR)

CDR, de acordo com Jucá *et al.* (2014), é um termo que se aplica a materiais que tem um valor calorífico elevado, geralmente cerca de 18 megajoules por quilograma, recuperado da coleta de resíduos, que podem beneficiar por exemplo fornos de cimento e centrais de energia elétrica. O CDR pode ser composto de material orgânico com baixa umidade, e não deve possuir frações de contaminação crítica, como os metais pesados (Cr, CD, Pb etc.), e nem substâncias críticas como halogenadas ou resíduos infectados, pois podem gerar uma produção de CDR de baixa qualidade. Além disso, pode ser utilizado também rejeito de coleta seletiva. A produção de CDR tem como principal importância a recuperação de energia e a otimização do transporte e armazenamento dos resíduos.

Já na visão de Rodrigues *et al*. (2017), os parâmetros principais que determinam o potencial da utilização dos resíduos para gerar energia são as características químicas e físicas (qualidade), e sua disponibilidade (quantidade). A legislação brasileira não traz nenhuma definição para o CDR, porém, é comumente definido como a fração sólida com poder calorífico alto e pode ser composto por plástico, madeira, têxteis, borracha, embalagens diversas, restos de matéria orgânica, entre outros, desde que sejam isentos de materiais clorados, remanescente após a retirada da fração reciclável dos RSU. (Rodrigues *et al*. 2017)

O processo de produção do CDR gera rejeitos que devem ser eliminados. O percentual dos rejeitos, segundo Jucá *et al*. (2014), varia de 20 a 80% dependendo da qualidade do resíduo e do tipo de sua coleta e separação. Já de acordo com Rodrigues *et al*. (2017), a quantidade produzida de CDR vai variar de acordo com o tipo de coleta, processamento e padrão de qualidade exigido.

3.3. DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo a PNRS, a disposição final ambientalmente adequada é a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, e a minimizar os impactos ambientais adversos.

Com a expansão das cidades, aumenta ainda mais a necessidade de dar um destino final adequado aos resíduos coletados pois, quando há uma coleta ineficiente dos resíduos sólidos, normalmente, há uma insatisfação por parte da população e uma pressão às prefeituras para que haja uma melhora neste quesito. Diante de um orçamento restrito, é comum observar em municípios de menor porte a presença de lixões sem quaisquer cuidados ambientais, o que ocorre hoje na cidade de Pirenópolis. (Araújo *et al*. 2001)

3.3.1. Aterros Sanitários

De acordo com Boscov (2014), o aterro sanitário pode ser definido como um sistema devidamente preparado para a deposição dos resíduos sólidos urbanos no solo, englobando componentes e práticas operacionais como a divisão em células, compactação dos resíduos, cobertura, sistema de impermeabilização, sistemas de drenagem e tratamento para líquidos e gases, monitoramento geotécnico e ambiental, entre outras coisas. O aterro sanitário é fundamentado em critérios de engenharia e normas operacionais, onde permite o confinamento seguro, garantindo o controle da poluição ambiental e, principalmente, a proteção à saúde pública.

Muito se confunde o aterro sanitário de aterros controlados, porém, no aterro controlado os resíduos, mesmo que cobertos com solo e eventualmente compactados, não tem impermeabilização, drenagem, tratamento de chorume e qualquer outra garantia de controle de poluição e proteção à saúde pública que o aterro sanitário tem. Já os lixões a céu aberto são caracterizados pela deposição do resíduo sólido sem nenhum tipo de preparo e tratamento, podendo assim poluir o meio ambiente, contaminar o solo e eventualmente as águas subterrâneas. (Araújo, *et al*. 2001)

Para Recesa (2010), o Aterro Sanitário também pode ser considerado como uma tecnologia de tratamento de resíduos a partir de certos processos físicos, químicos e biológicos, a partir da forma de um reator anaeróbio, que tem como o resultado uma massa de resíduos química e biologicamente mais estável, além de ser o local de disposição final dos resíduos. Já para Jucá *et al.* (2014), o aterro sanitário, muito utilizado no Brasil e no mundo, é a tecnologia universal de disposição final de resíduos sólidos urbanos e, para se cumprir o que se determina na PNRS, antes do RSU ser encaminhado para o aterro sanitário, é imprescindível que seja primeiramente reciclado, tratado e/ou reutilizado, visando prolongar a sua vida útil. Sendo assim, apenas os rejeitos, que são os resíduos que não podem mais ser recuperados sob nenhuma hipótese, ou então para os quais não exista mercado, devem ser encaminhados para o aterro sanitário.

Apenas os resíduos considerados não perigosos, os resíduos Classe IIA e IIB, podem ser encaminhados para os aterros sanitários e, para atender a PNRS, podem ser empregados aterros sanitários com ou sem geração de energia e aterros sanitários de pequenos portes.

A norma ABNT NBR 8919/1984 tem como finalidade prevenir danos à saúde pública, e normatiza os aterros sanitários minimizando ainda os impactos ambientais decorrentes da disposição dos resíduos.

Os aterros sanitários classificam-se a partir dos seus projetos, e podem ser em vala, em trincheira, em encosta, ou em área (Figura 7). Na Figura 8 pode ser observado o aterro sanitário de Brasília DF.

Figura 7- Aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.



Fonte: IPT, 2000

Figura 8 - Aterro sanitário de Brasília DF



Fonte: SLU - DF

3.4. ROTAS TECNOLÓGICAS

Rota tecnológica, segundo Jucá *et al.* (2014), "é um conjunto de processos, tecnologias e fluxos dos resíduos, desde a sua geração até o seu destino final", envolvendo desde a coleta de todo o tipo de resíduos, até a coleta seletiva. A rota tecnológica contempla o fluxo de tecnologias de tratamento levando em consideração ou não a valorização energética, e se enquadra no contexto de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos.

Para a definição de uma rota tecnológica pelo município, deverão ser seguidos os preceitos do artigo 9º da Lei nº 12.305 da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), que trata da

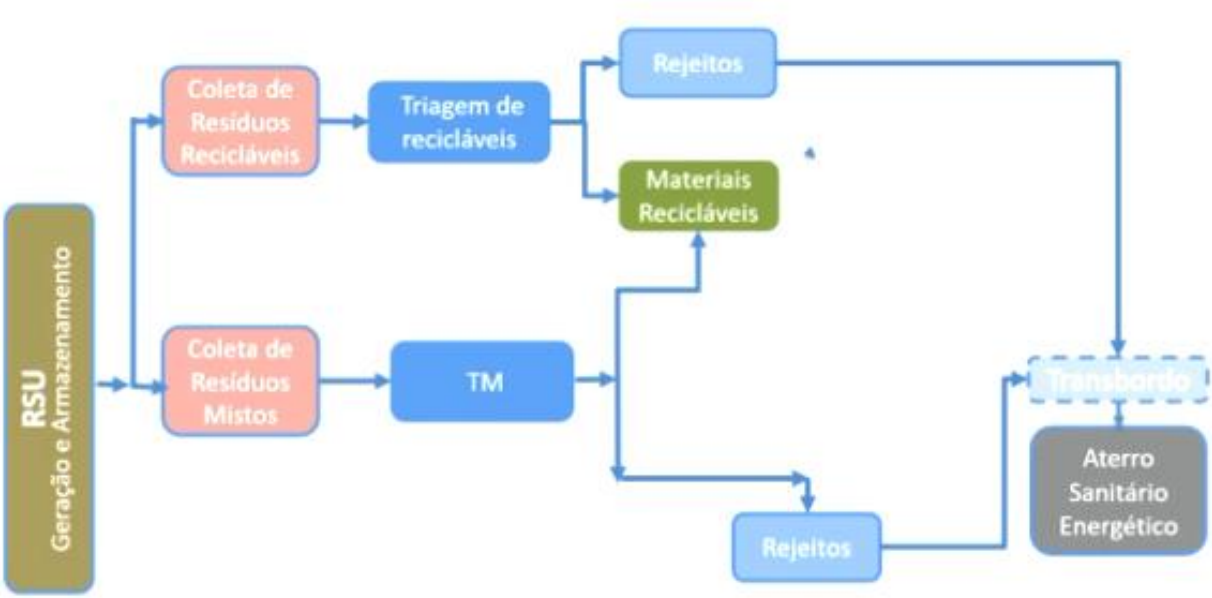
hierarquia que deverá ser aderida na gestão dos resíduos sólidos urbanos, como pode ser observado a seguir:

> *Art. 9o Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.*
>
> *§ 1o Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.*
>
> *§ 2o A Política Nacional de Resíduos Sólidos e as Políticas de Resíduos Sólidos dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios serão compatíveis com o disposto no caput e no § 1o deste artigo e com as demais diretrizes estabelecidas nesta Lei.*

Sendo assim, a rota tecnológica inicia-se desde a geração dos resíduos na fonte, e encerra-se com a disposição final ambientalmente adequada.

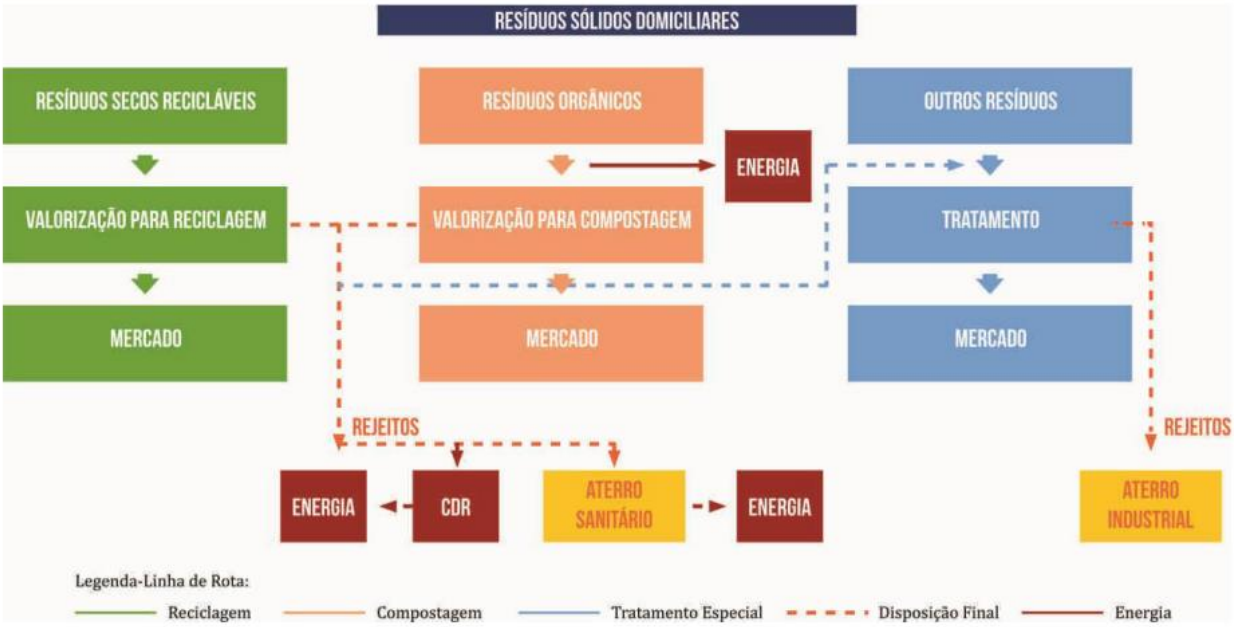
Alguns tipos de rotas tecnológicas podem ser observados a partir das Figura 9 e Figura 10.

Figura 9- Rota Tecnológica



Fonte: Reichert G. A. 2022

Figura 10 Rota Tecnológica para Resíduos Sólidos Domiciliares do Distrito Federal – cenário desejável



Fonte: PDGIRS DF - ADASA

Para o tratamento de resíduos sólidos urbanos, hoje em dia há uma gama de possibilidades de tecnologia, como o aterro sanitário, a triagem, a compostagem a reciclagem, produção de CDR, tratamentos térmicos, entre outros, e as tecnologias não trabalham com máxima eficiência de forma individual. Sendo assim, há a necessidade de se utilizar do gerenciamento integrado e encadeamento de diferentes tecnologias para encontrar uma eficiência de boa qualidade para cada município fazer a gestão correta e adequada dos resíduos sólidos urbanos.

3.5. MODELOS DE SIMULAÇÃO

A modelagem e simulação de sistemas permitem a representação desses sistemas por modelos de simulação e reproduzir suas cadeias de causalidade, estimar e avaliar resultados e subsidiar o processo de tomada de decisões em nível de engenharia. (Leal, 2022)

A técnica de modelagem de cenários, aplicada ao gerenciamento de RSU, pode ser importante considerando o esgotamento iminente da capacidade de um aterro sanitário. Sendo assim, existe a necessidade de uma discussão de possibilidades e estratégias de gestão de resíduos sólidos para contribuir na melhoria da gestão. (Melo *et al.* 2009)

A partir da modelagem de cenários, há a possibilidade de sugerir técnicas para cenários futuros como ferramenta para o planejamento da gestão de resíduos sólidos, a partir de dados do PMGIRS de Pirenópolis, para a caracterização dos cenários e a construção de cenários alternativos da produção e manejo dos resíduos do município. Sendo assim, é muito importante que haja um planejamento a longo prazo.

A modelagem de cenários pode ser utilizada no planejamento estratégico dentro de diversas áreas, inclusive na de resíduos sólidos. Projetar um cenário futuro da geração de resíduos sólidos urbanos pode vir a contribuir com o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento integrado (Dakalopoulos, 1998), inclusive, para a geração de rotas tecnológicas.

Um aspecto muito importante da técnica de modelagem de cenários é a coleta de informações, pois é a etapa crucial para subsidiar a formulação dos princípios teóricos de interpretação do sistema em análise. (Caridade *et al*. 2006)

Os modelos de simulação têm limitações da utilização de cada ferramenta, como limitações sobre a entrada de dados, tecnologias existentes e robustez de cada análise. As limitações da ferramenta do PROTEGEER serão abordadas no tópico 3.7.

3.6. PMGIRS de PIRENÓPOLIS

O Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos de Pirenópolis cita objetivos específicos e metas para indicar mecanismos e apontar estrutura operacional e de gestão para as seguintes vertentes:

1- Implementar sistema de coleta seletiva em substituição ao sistema existente de coleta convencional dos resíduos comuns;
2- Considerando a segregação na fonte geradora, participação direta dos catadores de Pirenópolis, implementação de sistema de tratamento dos resíduos incluindo triagem, classificação e prensagem dos materiais reciclados, assim como compostagem de parcela orgânica dos resíduos públicos;
3- Implementação de sistema de coleta, tratamento e destinação final de resíduos;
4- Instituir sistema de cobrança de taxa de limpeza pública;
5- Instituir sistema de fiscalização, comunicação social e educação ambiental;
6- Criar estrutura de gestão técnica, administrativa e financeira;
7- Instituir dinâmica para desenvolvimento de instrumentos regulamentadores.

O PMGIRS deve seguir conteúdo mínimo de acordo com a Lei nº 12.305/2020, no Art. 19, e o do município de Pirenópolis está dividido em 10 tópicos, com 106 páginas, e é instituído pela Lei municipal nº 714/2012, onde estabelece as diretrizes para a Política Municipal de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos. Além disso, a análise gravimétrica dos resíduos, o que foi feito na fase de diagnóstico do PMGIRS, está representada na Tabela 2. Vale ressaltar que, segundo o PMGIRS, são coletados semanalmente 448 toneladas de resíduos sólidos comuns, totalizando uma média de 64 toneladas por dia da semana.

Tabela 2- Composição Gravimétrica resíduos sólidos comuns em Pirenópolis

Componentes	**Porcentagem**
Restos de Alimentos	29,46%
Restos de Podas	12,01%
Coco	2,02%
Papel Reciclável	1,42%
Papelão	6,01%
Tetra Pack	1,02%
Plástico Mole	9,01%
Plástico Duro	2,76%
Pet	4,18%
tFerro	0,76%
Lata de Alumínio	0,82%
Metal	0,79%
Vidro	4,99%
Lixo de Banheiro	5,02%
Trapo	9,08%
Entulho	0,48%
Outros	2,22%
Terra/Areia	0,81%
Refugo Final	7,09%
Total	**100,0%**

Fonte: PMIGRS, 2015, p. 9. Adaptado.

No PMGIRS (2018) cada item é definido da seguinte maneira:

> *• Restos de Alimentos: Sobra de alimentos oriundos de cozinhas residenciais e comerciais, contendo grande diversidade de sobras de comida, além de cascas e apartes de alimentos que não foram utilizados na elaboração do prato;*
>
> *• Restos de Podas: Sobra de material oriundo de podas de jardins doméstico e comercial, contendo galhos, ramos, folhas e partes de plantas, é considerado como restos de podas o material oriundo da feira do município sendo este impróprio para a alimentação humana como, restos de cana de açúcar, folhagens estragadas em geral e etc;*
>
> *• Coco: cascas de cocos verdes ou secos já consumidos sua água ou não;*
>
> *• Papel Reciclável: Todo tipo de papel que pode ser reciclado, como jornal, revista, papel branco, papel colorido panfletos e cartões;*
>
> *• Papelão: Papelão pardo ou colorido composto por gramatura utilizada na indústria de aparas, geralmente este material é oriundo de embalagens;*
>
> *• Tetra Pack: Material heterogêneo, composto por quatro tipos de material sendo eles papel, papelão, plástico e alumínio. Geralmente este material é utilizado no armazenamento de alimentos como sucos, leite e etc;*
>
> *• Plástico Mole: basicamente composto por embalagens de alimentos (sacolinhas) sendo este encontrado em grande quantidade e cores como o plástico filme, colorido e o preto utilizado em sacos de lixo;*
>
> *• Plástico Duro: composto por balde/bacia, embalagem de margarina, garrafões de água mineral de 20 litros, cadeiras de plástico, vasilhames em geral com exceção do pet e que sejam plásticos, além de plásticos duros diversos;*
>
> *• Pet: composto por todos os recipientes do tipo pet, como os de refrigerante, água mineral, óleo de comida, e embalagens*
>
> *• Ferro: Composto por material ferroso de todas as origens;*
>
> *• Lata de Alumínio: Composto somente por latinha de alumínio oriunda de embalagens de cerveja, refrigerantes e energéticos;*
>
> *• Metal: Composto por todos os metais com exceção do ferro, tendo como exemplo o cobre, inox, alumínio duro, amianto, magnésio, embalagens de desodorantes de alumínio etc.;*
>
> *• Vidro: basicamente composto por recipientes de medicação, bebidas e outros desde que sua composição seja somente composta por vidro.*
>
> *• Trapo: Classificado como trapo as sobras de pano, roupas velhas, sapatos, bolas de couro, sandálias e etc;*
>
> *• Lixo de Banheiro: Composto por material impossibilitado de reaproveitamento por estar contaminado tem em sua composição papel higiênico utilizado, fraldas, absorventes, algodão usado etc;*
>
> *• Entulho: Material oriundo de sobras de construção, como telhas, tijolos, pedras entre outros, foi considerado apenas o material coletado junto com o lixo domiciliar desconsiderando assim as caçambas que realizam apenas a coleta deste resíduo, com objetivo de não mascarar a amostra já que a quantidade de entulho na época do estudo era muito alta. Foram*

observados e anotados os tipos de veículos coletores além do volume estimado e estes dados fazem parte do estudo;

• Outros: São considerados como outro todo o material sem classificação, como isopor, madeira, borracha, pneus, espelho, cerâmica, acrílico etc.;

• Terra/Areia: Composto por material de varrição, paisagismo, construção etc.; e

• Refugo Final: O refugo final foi computado após a retirada de todos os materiais que se inserem na classificação acima, restando uma mistura de terra, areia, folhas e itens pequenos sem importância para o comercio de recicláveis. Esta sobra de material que chamamos de refugo final é o que sobra após a retirada de todos os itens e que não se consegue separar mais devido ao alto custo e baixo benefício, este material no dia a dia faz parte do rejeito e deve ser levado ao aterro sanitário ou lixão.

3.7. FERRAMENTA ROTAS TECNOLÓGICAS

A Ferramenta Rotas e Custos é uma ferramenta do governo brasileiro, desenvolvida no âmbito do ProteGEEr, e foi concebida em uma planilha do Microsoft Excel pelos autores Reichert e Paula em 2021, e é dividida em duas partes.

A primeira parte da ferramenta consiste na definição da rota e do balanço de massa, e a segunda parte faz a estimativa dos custos associados e o cálculo da tarifa correspondente à rota simulada. A ferramenta conta com 21 abas no Microsoft Excel, porém, dessas, 15 abas são de cálculos e somente 6 delas são para entrada de dados.

Segundo Reichert, 2022, a ferramenta de rotas de custos te compara alternativas, onde a alternativa inicial é a situação atual do município, e as premissas e diretrizes para as rotas na ferramenta se baseiam em:

- Realizar o balanço de massa e de energia das rotas avaliadas;
- Avaliar a possibilidade de implantação dos avanços tecnológicos e novas formas de tratamento de maneira escalonada;
- Atentar para a compatibilização da rota tecnológica com as metas do PMGIRS;
- Avaliar e quantificar todos os subprodutos que possuam resultar em receitas acessórias ao sistema;
- Atender a hierarquia do gerenciamento integrado de resíduos estabelecido no Art. 9º da Lei 12.305/2010;
- Considerar rotas tecnológicas consolidadas nacional ou internacionalmente, e que sejam licenciáveis de acordo com a legislação brasileira vigente.

Além disso, o sistema pode simular as seguintes tecnologias:

- Coletas:
  - Seletiva de recicláveis secos;
  - Seletiva de orgânicos;
  - Mistos
- Triagem:
  - Manual de seletivos;
  - Mecanizada de seletivos;
  - Mecanizada de mistos;
- Produção de CDR:
  - CDR de secos;
  - Biossecagem e CDR de orgânicos;
- Tratamento biológico:
  - Compostagem: composto para uso no solo ou cobertura de AS;
  - Biodigestão anaeróbia: Biogás para energia elétrica ou biometano;
- Existência ou não de estação de transferência;
- Disposição final:
  - Aterro sanitário com ou sem aproveitamento de biogás para energia elétrica ou biometano.

O escopo da ferramenta é a comparação de alternativas existentes com alternativas futuras de gerenciamento e manejo de RSU, com a possibilidade de realizar o balanço de massa e calcular os seus custos associados. A ferramenta traz como resultados cenários de rotas tecnológicas com alternativas de sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. Por conseguinte, a ferramenta traz potencialidades de construção e avaliação de soluções integradas para o manejo de RSU, e a realização de estudo de pré-viabilidade da implantação da rota tecnológica sugerida com estimativa final de valor total de tratamento por etapa e da rota completa, e sua tarifa associada à rota. (Reichert, G.A. 2022)

Limitações da Ferramenta:

- A composição gravimétrica deve representar o total da massa de resíduos manejados;
- A ferramenta abrange apenas os tipos de coleta: Seletiva de secos, seletiva de orgânicos e mistos;
- A eficiência da triagem é única para todos os materiais triados;

- Somente é possível utilizar as tecnologias pré-definidas na ferramenta, que são tecnologias já consolidadas;
- Somente uma rota pode ser simulada por vez;
- A robustez das análises e conclusões está limitada pela qualidade das informações premissas à simulação.

As principais saídas da ferramenta são:

- Figura fluxo de massa da rota avaliada;
- Capacidades operacionais totais das unidades utilizadas;
- Quantitativos dos subprodutos por rota;
- Consolidação dos dados saída das rotas para a necessidade dos dados de entrada da ferramenta GEE;
- Análise de custos.

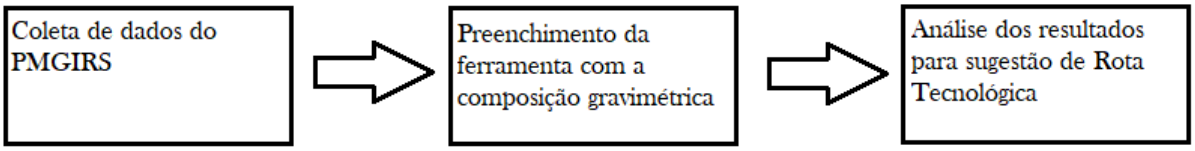
4. MATERIAIS E MÉTODOS

É importante salientar que para a modelagem foi levado em consideração a situação atual de Pirenópolis e as tecnologias de tratamento de RSU mais usadas no Brasil que, de acordo com Reichert (2022), são: Aterro sanitário, Compostagem e Central de Triagem. Foram modelados 4 cenários para o município de Pirenópolis.

O conjunto de dados disponíveis para este trabalho é composto por resíduos sólidos urbanos comuns e resíduos especiais. Todos os dados serão colocados no software, porém, devido à limitação da ferramenta de gerar rota apenas para resíduos sólidos urbanos, então, o resultado abordará a gestão integrada para RSU, descritos na Tabela 1.

Para aplicação da ferramenta rotas e custos é necessário que seja feita a coleta da composição gravimétrica para inserir na ferramenta, pois é uma limitação que essa composição deve representar o município por inteiro.

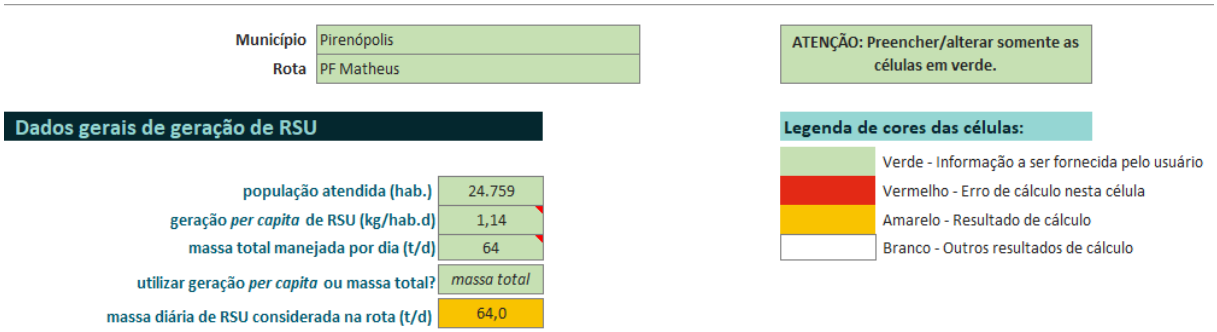
Figura 11- Fluxograma da metodologia



Posteriormente, após a coleta dos dados, é feito o preenchimento da ferramenta com os dados do município e da geração per capita de RSU na aba de entrada (Figura 12).

Na aba de entrada, coloca-se o nome do município, seguido da identificação da rota tecnológica. Essas informações são inseridas apenas uma única vez nessa aba, e as demais já puxam os dados de forma automática. Além disso, é preenchida a população total atendida e as informações para o cálculo de massa diária de RSU a ser considerada na rota que está sendo simulada. (ProteGEEr, 2021)

Figura 12 - Preenchimento dos dados do município e da geração per capita de RSU



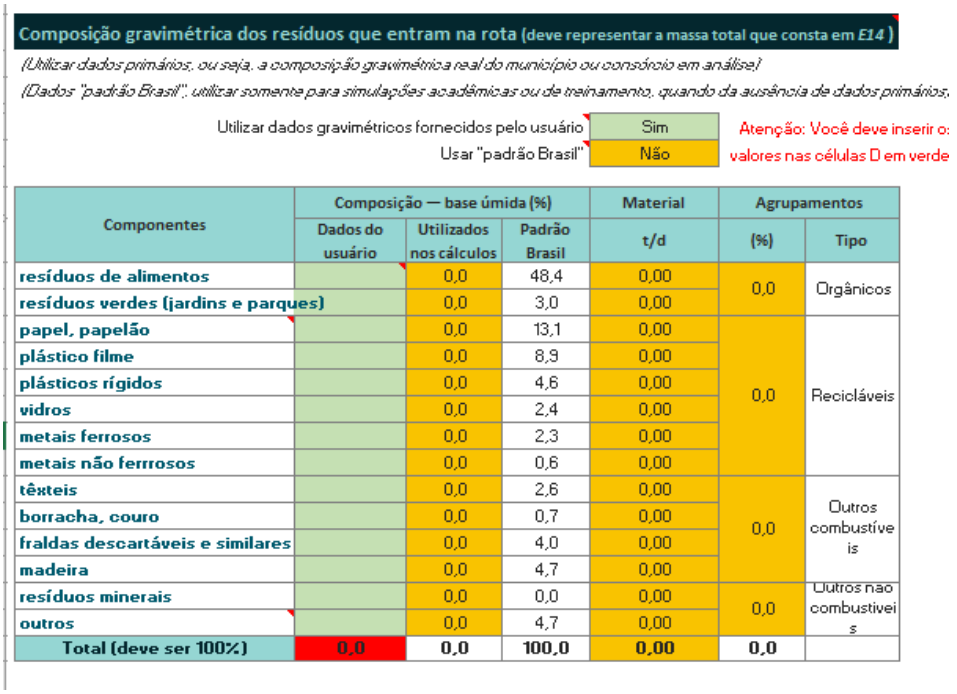
Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

A população total atendida e as informações para calcular a massa diária de RSU também é preenchido nessa etapa, e para o cálculo da massa diária, a Ferramenta assume os dias úteis de coleta, ou seja, 6 dias por semana, 26,08 dias por mês ou 313 dias por ano. (ProteGEEr, 2021)

Os dados da composição gravimétrica, como pode ser observado na

Figura 13, devem ser informados de forma a representar a massa total de resíduos que entra na rota. Posteriormente, a ferramenta calculará as massas de cada uma das frações presentes nos resíduos (“materiais/tipos de RS”), que servirão como limites máximos aos sistemas de coletas seletivas que serão definidos posteriormente.

Figura 13 - Aba para preenchimento de composição gravimétrica na ferramenta



Composição gravimétrica dos resíduos que entram na rota (deve representar a massa total que consta em *E14*)

(Utilizar dados primários, ou seja, a composição gravimétrica real do município ou consórcio em análise)

(Dados "padrão Brasil": utilizar somente para simulações acadêmicas ou de treinamento, quando da ausência de dados primários)

Utilizar dados gravimétricos fornecidos pelo usuário: Sim
Usar "padrão Brasil": Não
Atenção: Você deve inserir o: valores nas células D em verde

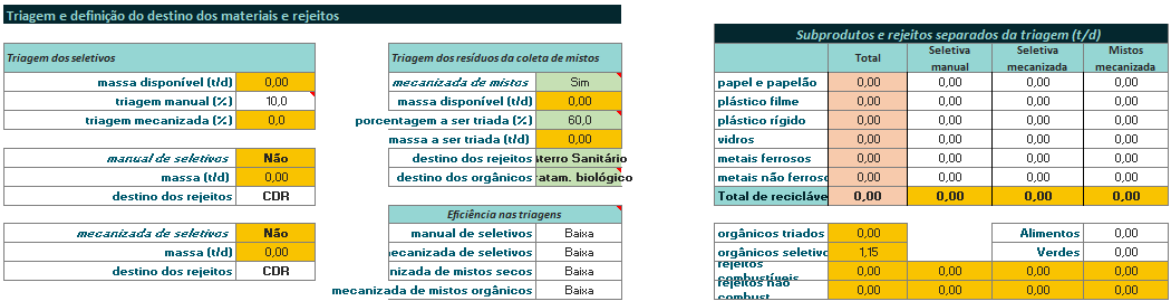
Componentes	Composição — base úmida (%)			Material	Agrupamentos	
	Dados do usuário	Utilizados nos cálculos	Padrão Brasil	t/d	(%)	Tipo
resíduos de alimentos		0,0	48,4	0,00	0,0	Orgânicos
resíduos verdes (jardins e parques)		0,0	3,0	0,00		
papel, papelão		0,0	13,1	0,00	0,0	Recicláveis
plástico filme		0,0	8,9	0,00		
plásticos rígidos		0,0	4,6	0,00		
vidros		0,0	2,4	0,00		
metais ferrosos		0,0	2,3	0,00		
metais não ferrosos		0,0	0,6	0,00		
têxteis		0,0	2,6	0,00	0,0	Outros combustíveis
borracha, couro		0,0	0,7	0,00		
fraldas descartáveis e similares		0,0	4,0	0,00		
madeira		0,0	4,7	0,00		
resíduos minerais		0,0	0,0	0,00	0,0	Outros não combustiveis
outros		0,0	4,7	0,00		
Total (deve ser 100%)	0,0	0,0	100,0	0,00	0,0	

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

Na segunda aba da ferramenta, será alimentado com os dados nas seguintes vertentes:

- Triagem e definição do destino dos materiais e rejeitos (Figura 14): etapa que se inicia efetivamente a definição da rota tecnológica que será adotada.;

Figura 14 - Triagem e definição do destino dos materiais e rejeitos (ProteGEEr)



Triagem e definição do destino dos materiais e rejeitos

Triagem dos seletivos	
massa disponível (t/d)	0,00
triagem manual (%)	10,0
triagem mecanizada (%)	0,0
manual de seletivos	Não
massa (t/d)	0,00
destino dos rejeitos	CDR
mecanizada de seletivos	Não
massa (t/d)	0,00
destino dos rejeitos	CDR

Triagem dos resíduos da coleta de mistos	
mecanizada de mistos	Sim
massa disponível (t/d)	0,00
porcentagem a ser triada (%)	60,0
massa a ser triada (t/d)	0,00
destino dos rejeitos	terro Sanitário
destino dos orgânicos	atam. biológico

Eficiência nas triagens	
manual de seletivos	Baixa
ecanizada de seletivos	Baixa
nizada de mistos secos	Baixa
mecanizada de mistos orgânicos	Baixa

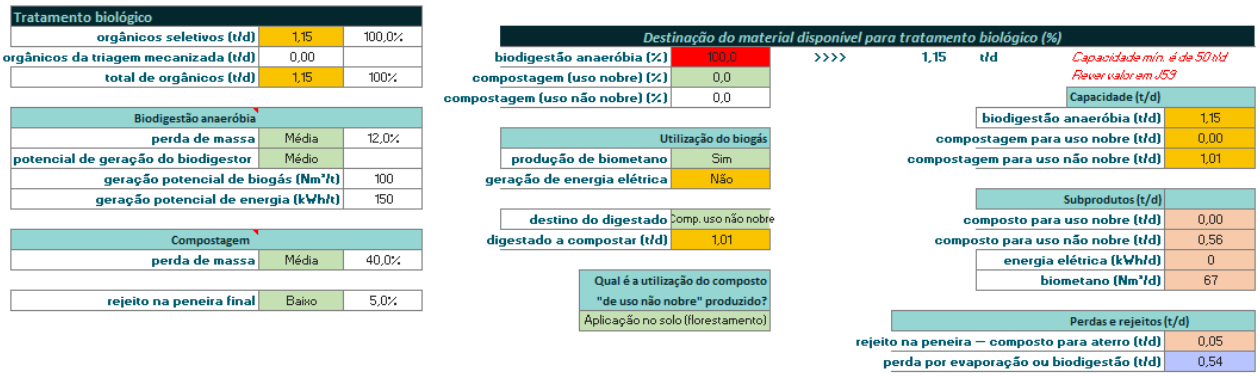
Subprodutos e rejeitos separados da triagem (t/d)

	Total	Seletiva manual	Seletiva mecanizada	Mistos mecanizada
papel e papelão	0,00	0,00	0,00	0,00
plástico filme	0,00	0,00	0,00	0,00
plástico rígido	0,00	0,00	0,00	0,00
vidros	0,00	0,00	0,00	0,00
metais ferrosos	0,00	0,00	0,00	0,00
metais não ferros	0,00	0,00	0,00	0,00
Total de recicláve	0,00	0,00	0,00	0,00

orgânicos triados	0,00		Alimentos	0,00
orgânicos seletiv	1,15		Verdes	0,00
rejeitos	0,00	0,00	0,00	0,00
rejeitos não combust	0,00	0,00	0,00	0,00

- Tratamento biológico e destinação do material disponível para tratamento biológico (%): porcentagem para o destino da fração orgânica. (Figura 15);

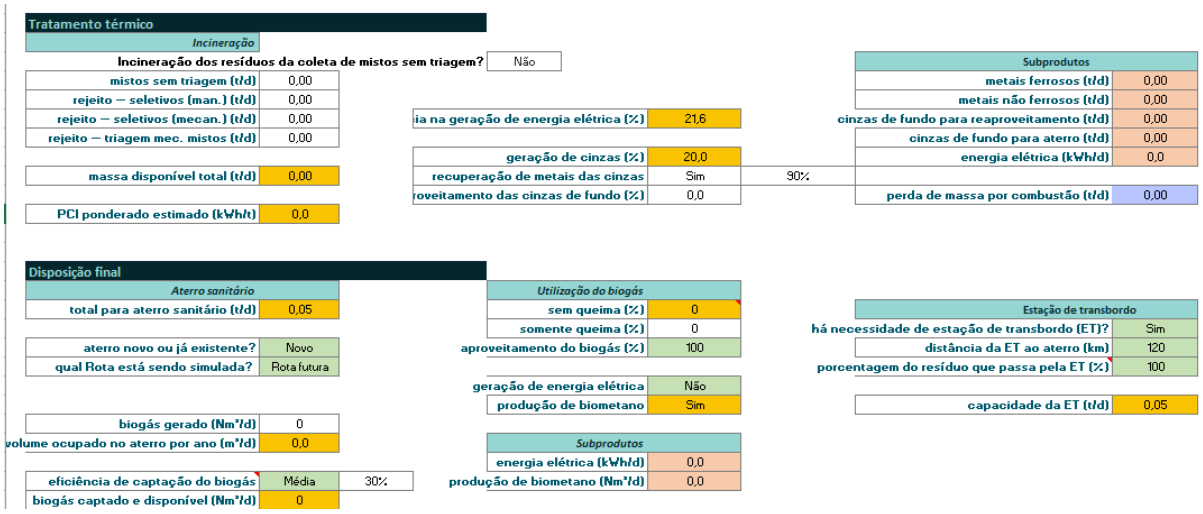
Figura 15 - Tratamento biológico e destinação do material disponível para tratamento biológico (%)



Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

- Tratamento térmico e disposição final: porcentagem para o tratamento térmico.(Figura 16).

Figura 16 - Tratamento térmico e disposição final

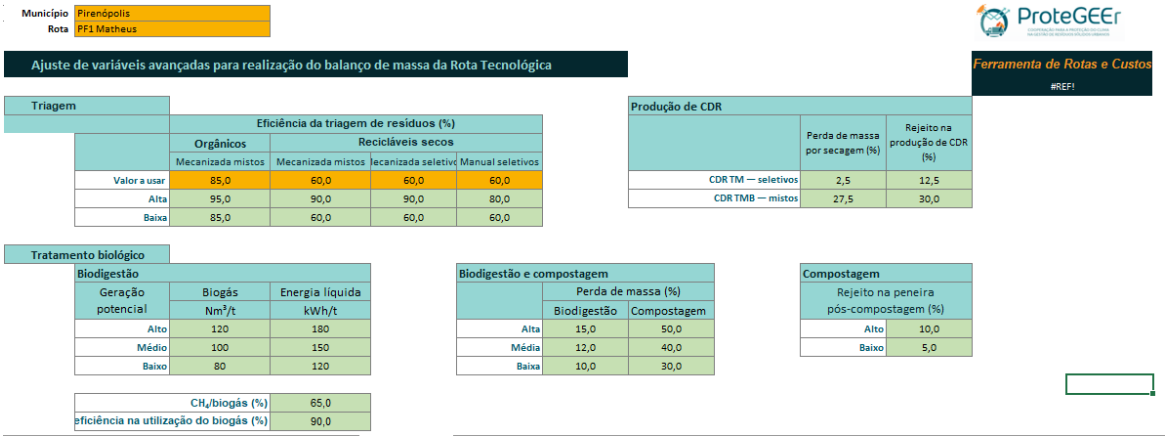


Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

Por fim, será feito o preenchimento do ajuste de variáveis para realizar o balanço de massa: variáveis avançadas para o cálculo do balanço de massa da rota feitos na aba de definição. No caso, serão inseridos valores de referência parametrizados, a partir de levantamentos de referencial teórico, para afinar os resultados que a ferramenta poderá trazer.

Os valores das células em verde poderão ser alterados quando necessário (Figura 17). (ProteGEEr, 2021)

Figura 17 - Preenchimento de variáveis avançadas para realização de balanço de massa da Rota Tecnológica.



Município	Pirenópolis
Rota	PF1 Matheus

Ajuste de variáveis avançadas para realização do balanço de massa da Rota Tecnológica

Ferramenta de Rotas e Custos

#REF!

Triagem

	Eficiência da triagem de resíduos (%)			
	Orgânicos	Recicláveis secos		
	Mecanizada mistos	Mecanizada mistos	lecanizada seletivo	Manual seletivos
Valor a usar	85,0	60,0	60,0	60,0
Alta	95,0	90,0	90,0	80,0
Baixa	85,0	60,0	60,0	60,0

Produção de CDR

	Perda de massa por secagem (%)	Rejeito na produção de CDR (%)
CDR TM — seletivos	2,5	12,5
CDR TMB — mistos	27,5	30,0

Tratamento biológico

Biodigestão

Geração potencial	Biogás	Energia líquida
	Nm^3/t	kWh/t
Alto	120	180
Médio	100	150
Baixo	80	120

CH_4/biogás (%)	65,0
eficiência na utilização do biogás (%)	90,0

Biodigestão e compostagem

	Perda de massa (%)	
	Biodigestão	Compostagem
Alta	15,0	50,0
Média	12,0	40,0
Baixa	10,0	30,0

Compostagem

	Rejeito na peneira pós-compostagem (%)
Alto	10,0
Baixo	5,0

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a área do futuro aterro sanitário, de acordo com o PMGIRS, foi considerado como sendo a melhor opção para destinação final dos resíduos sólidos a manutenção de onde hoje é o lixão. A área da prefeitura tem aproximadamente 15 hectares, sendo assim, há espaço suficiente para estabelecer o aterro sanitário, estrutura de apoio para funcionários, guarita de segurança, galpão para triagem, balança rodoviária, garagem e galpão para depósito de equipamentos, pátio para compostagem e sistemas de tratamento de lixiviado, assim como instalação para possível produção de CDR.

Não serão utilizadas as tecnologias de biodigestão anaeróbia, produção de CDR e incineração para a modelagem dos cenários considerando apenas o município de Pirenópolis com sua população atual, devido ao seu porte e da quantidade de resíduos gerados, com cerca de 40 ton/dia de resíduos orgânicos e 30 ton/dia de resíduos recicláveis pois, de acordo com Paula *et al.* (2018), para destinar o material à biodigestão anaeróbia ou para a produção de CDR, há a necessidade de geração de, pelo menos, 50 ton/dia, enquanto para a incineração, há a necessidade de 500 ton/dia.

O resultado de volume aterrado de resíduos por dia foi retirado da própria ferramenta, na aba de fluxo de massa, após inserir todos os indicadores.

5.1. INDICADORES AVANÇADOS

Os indicadores estudados por Paula *et al*. (2018) para a aba "Avançado da Ferramenta Rotas" e Custos foram mantidos conforme as tabelas 3 a 10, a seguir.

Tabela 3 - Indicadores de Eficiência da Triagem de Resíduos

	Eficiência da triagem de resíduos (%)			
	Orgânicos	Recicláveis secos		
	Mecanizada mistos	Mecanizada mistos	Mecanizada seletivos	Manual seletivos
Valor a usar	85,0	60,0	60,0	60,0
Alta	95,0	90,0	90,0	80,0
Baixa	85,0	60,0	60,0	60,0

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

Tabela 4 - Indicadores de Biodigestão

Biodigestão		
Geração potencial	Biogás	Energia líquida
	Nm^3/t	kWh/t
Alto	120	180
Médio	100	150
Baixo	80	120

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

Tabela 5 - Indicadores de Biodigestão e Compostagem

Biodigestão e compostagem		
	Perda de massa (%)	
	Biodigestão	Compostagem
Alta	15,0	50,0
Média	12,0	40,0
Baixa	10,0	30,0

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

Tabela 6 - Indicadores de Compostagem

Compostagem	
Rejeito na peneira pós-compostagem (%)	
Alto	10,0
Baixo	5,0

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

Tabela 7 - Indicadores de Incineração

Incineração	
	%
eficiência na geração de energia elétrica	21,6
geração de cinzas	20,0
recuperação de metais das cinzas	90,0

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

Tabela 8 - Indicadores de Aterro Sanitário

Aterro sanitário		
Eficiência na captação do biogás (%)		
Alta	**Média**	**Baixa**
50,0	30,0	10,0

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

Tabela 9 - Indicadores de Potencial Energético em Aterro Sanitário

Aterro sanitário			
			Valor
		potencial energético do biogás (MJ/Nm^3)	16,8
		eficiência na geração elétrica (%)	35,0
		CH_4/biogás (%)	60,0

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

Tabela 10 - Indicadores de Características das Frações dos Resíduos para Incineração e Aterro Sanitário

Características das frações dos resíduos (para incineração e aterro sanitário)										
	Características das frações dos resíduos									
	Orgânicos		Papel e papelão	Plástico		Vidro	Metais		Rejeitos/mistos	
	Alimentos	Parques/jardins		Filme	Rígido		Ferrosos	Não ferrosos	Combustíveis	Não combustíveis
PCI – incineração (GJ/t)	3,7	3,7	10,5	25,0	28,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0
de biogás no aterro (Nm³/t)	250,0	250,0	150,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0
Volume ocupado no aterro (m³/t)	1,11	1,11	1,05	1,04	1,04	0,51	0,32	0,93	1,11	0,70

Obs.: 1GJ = 277,78 kWh

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

5.2. COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA

Não obstante haja uma composição gravimétrica fornecida a partir do PMGIRS do município, para um melhor resultado seria interessante a existência de mais dados de gravimetria, considerando mais de uma época do ano, principalmente a população flutuante do município devido ao turismo. Como o município não apresentou essas informações no PMGIRS e no SNIS, nem através da Secretaria Municipal de Meio Ambiente, no cenário 2, será produzida a rota tecnológica considerando o número de habitantes segundo a população flutuante do Censo Hoteleiro de 2018/2019 de Pirenópolis que, com base no trabalho técnico, estima que Pirenópolis apresenta um conjunto populacional (moradores e turistas) de 50.000 habitantes (GOIÁS, 2018)

O PMGIRS cita que são coletados semanalmente cerca de 448 toneladas de resíduos sólidos comuns em periodicidade segundo a tabela 11, não obstante, os dados não estão de acordo com a bibliografia que, por caminhão compactador, segundo Correia *et* al. (2018) tem capacidade de 9 a 12 toneladas, com 5 caminhões seria possível carregar, no máximo, 60 toneladas, sendo que, por exemplo, na segunda feira, esse limite é extrapolado.

Sendo assim, para os cenários, foram considerados como geração diária a população total e a geração per capita obtida no SINIR.

Tabela 11 - Cronograma de coleta Pirenópolis

Cronograma e quantitativos de resíduos coletados na coleta convencional		
Dia	**Quantidade (ton)**	**Descrição**
Segunda	100	5 caminhões
Terça	52	6 caminhões
Quarta	40	7 caminhões
Quinta	40	8 caminhões
Sexta	76	9 caminhões
Sábado	40	10 caminhões
Domingo	8	1 caminhão

Fonte: PMGIRS (2018) Adaptado

Como o PMGIRS fornece a gravimetria com parâmetros diferentes da Ferramenta Rotas e Custos, fez-se necessário adaptar os dados da tabela para atender às demandas do trabalho, como pode ser observado nas tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Tabela Preenchida na Ferramenta Rotas e Custos

FERRAMENTA ROTAS E CUSTOS		
Componentes	**Composição base úmida (%)**	**Consta no PMGIRS**
resíduos de alimentos	29,46	Restos de Alimentos
resíduos verdes	12,01	Restos de Podas
papel, papelão	8,45	Papel Reciclável, Papelão, Tetra Pack
plástico filme	13,19	Plástico Mole, Pet
plásticos rígidos	2,76	Plástico Duro
vidros	4,99	Vidro
metais ferrosos	0,76	Ferro
metais não ferrosos	1,61	Lata de Alumínio, Metal
têxteis	9,08	Trapo
borracha, couro	0	-
fraldas descartáveis e similares	5,02	Lixo de Banheiro
madeira	0	-
resíduos minerais	1,39	Terra, Areia e Entulho
outros	11,28	Coco, Outros e Refugo Final

Tabela 13- Gravimetria de Resíduos PMGIRS

Componentes	Porcentagem	Peso kg/dia
Restos de Alimentos	29,46%	29,46
Restos de Podas	12,01%	12,012
Coco	2,02%	2,02
Papel Reciclável	1,42%	1,42
Papelão	6,01%	6,01
Tetra Pack	1,02%	1,02
Plástico Mole	9,01%	9,01
Plástico Duro	2,76%	2,76
Pet	4,18%	4,18
Ferro	0,76%	0,76
Lata de Alumínio	0,82%	0,82
Metal	0,79%	0,79
Vidro	4,99%	4,99
Lixo de Banheiro	5,02%	5,02
Trapo	9,08%	9,08
Entulho	0,48%	0,58
Outros	2,22%	2,22
Terra/Areia	0,81%	0,81
Refugo Final	7,09%	7,04
Total	**100,0%**	**100,00**

Papel reciclável, papelão e *tetra pack* foram adicionados na aba "papel e papelão". O *tetra pack*, segundo a própria empresa, é constituído tanto de papel, como de polietileno e alumínio. Mesmo assim, segundo Paula *et al.* (2018), estes devem ser contabilizados na aba de "papel e papelão".

As demais categorias foram ajustadas da seguinte forma:

- Restos de Alimentos foi atribuído na aba de "resíduos de alimentos".
- Restos de Podas foi atribuído na aba de "resíduos verdes".
- Plástico mole e Pet foram atribuídos na aba de "plástico filme".
- Plástico duro foi atribuído à aba de "plásticos rígidos".

- Vidro foi atribuído na aba de “vidros”;
- Ferro foi atribuído na aba de “metais ferrosos”.
- Lata de Alumínio e Metal foram atribuídos na aba de “metais não ferrosos”.
- Trapo foi atribuído na aba de “têxteis”.
- Lixo de banheiro foi atribuído na aba de “fraldas descartáveis e similares”.
- Terra, Areia e Entulho foram atribuídos na aba de “resíduos minerais”.
- Coco, outros e refugo final foram atribuídos na aba de “outros”.

Borracha, couro e madeira são citados na Ferramenta de Rotas e Custos, porém não há essa informação no PMGIRS (2018), sendo, portanto, considerado que eles fazem parte da aba “outros” no documento do município, incorporando então a aba “outros” da ferramenta.

5.3. MODELAGEM – ABA DE ENTRADA

Para esta etapa do trabalho foram utilizados dados do SINIR 2019, SNIS 2020 e do PMGIRS com os dados de Pirenópolis, a fim de trabalhar com dados atualizados para melhor atender ao município. Os seguintes dados foram coletados:

- População total estimada: 24908 (SINIR, 2019)
- População urbana declarada: 16850 (SINIR, 2019)
- IRR = 0,71% (SINIR, 2019)
- Geração per capita de RSU: 1,14 kg/hab.dia (SINIR, 2019)
- Cobertura de coleta indiferenciada: 99,4%, calculado direto na célula de população atendida, valor atualizado de 24.759 (SINIR, 2019)
- Massa total coletada por dia = 100 ton/dia (PMGIRS, 2018)
- Coleta seletiva Meta 80% dos recicláveis, abrange 25% da coleta total. Foi colocado a coleta seletiva para 30% de recicláveis e 40% de orgânicos totalizando 70% do total de resíduos coletados, próximo à meta de 80% do SINIR. (SINIR, 2019)

5.4. MODELAGEM – ABA DE DEFINIÇÃO

Na etapa de triagem e definição do destino dos materiais e rejeitos, foi considerada tanto para a triagem manual quanto para mecanizada eficiência de triagem baixa, considerando que cerca

de 25% do material da coleta seletiva não será aproveitado na triagem manual e 40% do material não será aproveitado na mecanizada. (Paula et. al, 2018)

A Compostagem, na ferramenta, é dividida em uso nobre e não nobre. De acordo com Paula *et al.* (2021), compostagem de uso nobre pode ser utilizado para produzir alimentos na agricultura e geralmente é produzido a partir da coleta seletiva de orgânicos. Já o composto para uso não nobre pode ser utilizado para outros fins como florestamento, jardinagens, entre outras coisas. Como ainda não existe a coleta seletiva de orgânicos, foi escolhido pela compostagem para uso não nobre a maior parte do material, contabilizando cerca de 80%, e o restante para uso nobre. A população deve passar por uma educação ambiental para se ambientar com a nova estrutura de coleta, processo que demanda tempo, de forma que o composto de uso nobre possa aumentar com o tempo a depender da qualidade do resíduo coletado.

Considerando as relações de consumo da população com a qualidade dos resíduos, segundo Roth e Melo (2008) quanto menos sustentáveis os modelos de consumo da população mais prejudicada será a qualidade do lixo e a situação do planeta, sendo assim, como o município não tem histórico de consumo e disposição ambientalmente adequada sustentável, serão adotados indicadores da seguinte forma:

- Triagem: Eficiência na triagem baixa, tanto manual quanto mecanizada.
- Compostagem: Perda de massa média, rejeito na peneira final alto.
- Biodigestão anaeróbia: Geração potencial de energia baixa.
- Tratamento térmico: Sem recuperação de metais nas cinzas, sem aproveitamento das cinzas de fundo.
- Aterro Sanitário: Eficiência de captação do biogás média, com aproveitamento de 50% para geração de energia elétrica.

Para todos os cenários foi considerado que não tem estação de transbordo e todas as tecnologias serão instaladas no mesmo terreno da prefeitura.

5.5. CENÁRIO 1

Sabendo que o objetivo do município é encerrar o lixão e abrir um aterro sanitário na região, foi considerado como destinação final um futuro aterro sanitário com central de triagem e tratamento de resíduos orgânicos com compostagem, visando uma rota tecnológica ideal para o município. Foi utilizado como massa total manejada por dia 28,23 ton/dia, considerando a

geração per capita de RSU e a população atendida de 24759 habitantes. Observa-se a composição gravimétrica para o cenário 1 na tabela 14.

Tabela 14 - Composição Gravimétrica Cenário 1

Componentes	Composição — base úmida (%)			Material	Agrupamentos	
	Dados do usuário	Utilizados nos cálculos	Padrão Brasil	ton/dia	(%)	Tipo
resíduos de alimentos	29,5	29,5	48,4	8,32	41,5	Orgânicos
resíduos verdes (jardins e parques)	12,0	12,0	3,0	3,39		
papel, papelão	8,5	8,5	13,1	2,39	31,8	Recicláveis
plástico filme	13,2	13,2	8,9	3,72		
plásticos rígidos	2,8	2,8	4,6	0,78		
vidros	5,0	5,0	2,4	1,41		
metais ferrosos	0,8	0,8	2,3	0,21		
metais não ferrosos	1,6	1,6	0,6	0,45		
têxteis	9,1	9,1	2,6	2,56	14,1	Outros combustíveis
borracha, couro	0,0	0,0	0,7	0,00		
fraldas descartáveis e similares	5,0	5,0	4,0	1,42		
madeira	0,0	0,0	4,7	0,00		
resíduos minerais	1,4	1,4	0,0	0,39	12,7	Outros não combustíveis
outros	11,3	11,3	4,7	3,18		
Total (deve ser 100%)	**100,0**	**100,0**	**100,0**	**28,23**	**100,0**	

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

5.5.1. Triagem de Seletivos

Na etapa de triagem e definição do destino dos materiais e rejeitos, foi considerado apenas a triagem manual dos seletivos, sem a triagem dos resíduos da coleta de mistos, pois, segundo Paula et. al (2018), a triagem dos resíduos da coleta mista é viável apenas caso haja pelo menos 50 ton/dia de massa disponível para a triagem. Considerando que o município é de pequeno porte, a triagem e definição do destino dos materiais e rejeitos foi escolhida de forma 100% manual, com eficiência de triagem baixa, dispensando-se da triagem mecanizada de mistos, visando maior alocação dos catadores presentes hoje no lixão.

Os subprodutos e rejeitos separados da triagem em ton/dia podem ser observados na tabela 15.

Tabela 15- Subprodutos e rejeitos separados da triagem Cenário 1

Subprodutos e rejeitos separados da triagem (ton/dia)				
	Total	**Seletiva manual**	**Seletiva mecanizada**	**Mistos mecanizada**
papel e papelão	1,35	1,35	0,00	0,00
plástico filme	2,11	2,11	0,00	0,00
plástico rígido	0,44	0,44	0,00	0,00
vidros	0,80	0,80	0,00	0,00
metais ferrosos	0,12	0,12	0,00	0,00
metais não ferrosos	0,26	0,26	0,00	0,00
Total de recicláveis	**5,08**	**5,08**	**0,00**	**0,00**
orgânicos triados	0,00		**Alimentos**	0,00
orgânicos seletivos	11,29		**Verdes**	0,00
rejeitos combustíveis	3,05	3,05	0,00	0,00
rejeitos não combust.	0,34	0,34	0,00	0,00

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

Após esta etapa, há uma separação de 11,29 ton/dia de orgânicos provindos da coleta seletiva, 3,05 ton/dia de rejeitos combustíveis, 0,34 ton/dia de rejeitos não combustíveis e 5,08 ton/dia do total de recicláveis.

5.5.2. Tratamento Biológico – Compostagem

O resíduo orgânico proveniente da coleta seletiva será destinado a compostagem de forma integral.

Considerando a perda de massa média de 40% e o rejeito na peneira final de 10% conforme as tabelas 5 e 6, obteve-se como subprodutos 1,13 ton/dia de composto para uso nobre, 4,52 ton/dia de composto para uso não nobre. Como resultado de perdas e rejeitos, obteve-se 1,13 ton/dia de rejeito na peneira, utilizado como composto para o aterro, enquanto 4,52 ton/dia foi perdido por evaporação (massa perdida para a atmosfera).

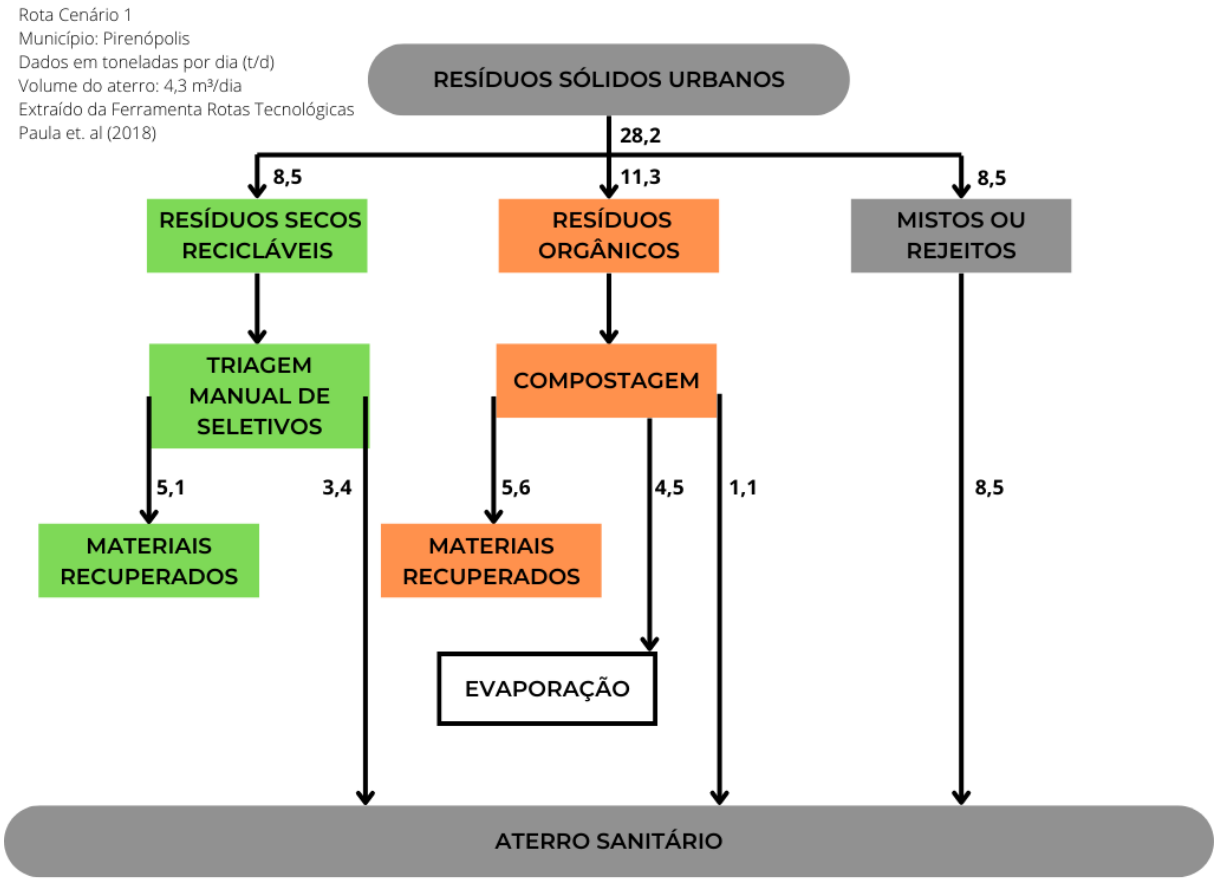
5.5.3. Disposição Final – Aterro Sanitário

Para o aterro sanitário, foram destinados o material que não foi recuperado da triagem manual de seletivos e dos resíduos orgânicos, somando um total de 12,98 toneladas por dia de resíduos, necessitando um volume de 4,3 m³/dia.

Como subproduto há a opção de geração de energia elétrica, somando em média de 202,5 kWh/dia para a quantidade de resíduo que é recebido, segundo a gravimetria inserida.

5.5.4. Rota Tecnológica Cenário 1

Figura 18 - Rota Tecnológica Cenário 1



Fonte: Ferramenta ProteGEEr, Adaptado.

5.6. CENÁRIO 2

Pirenópolis é uma cidade turística, sendo assim, há um acréscimo em sua população durante intervalos específicos do ano, além de sua população residente. Para este cenário foi considerada a população flutuante do Censo Hoteleiro de 2018/2019 de Pirenópolis que, com base no trabalho técnico, é possível considerar que Pirenópolis apresenta um conjunto populacional (moradores e turistas) estimado em 50.000 habitantes. (GOIÁS, 2018) Foi considerado como disposição final um futuro aterro sanitário com central de triagem e tratamento de resíduos orgânicos com compostagem, visando uma rota tecnológica ideal para o município nas condições estabelecidas.

Em relação à composição gravimétrica de resíduos sólidos, como o município não tem dados da composição gravimétrica considerando a população flutuante e, até o momento, não foram encontradas referências bibliográficas sobre o assunto, optou-se por utilizar a geração per capta do município que, para uma população de 50000 habitantes, há uma geração estimada de 57 ton/dia.

Tabela 16 - Composição Gravimétrica Cenário 2

Componentes	Composição — base úmida (%)			Material	Agrupamentos	
	Dados do usuário	Utilizados nos cálculos	Padrão Brasil	t/d	(%)	Tipo
resíduos de alimentos	29,5	29,5	48,4	16,79	41,5	Orgânicos
resíduos verdes (jardins e parques)	12,0	12,0	3,0	6,85		
papel, papelão	8,5	8,5	13,1	4,82	31,8	Recicláveis
plástico filme	13,2	13,2	8,9	7,52		
plásticos rígidos	2,8	2,8	4,6	1,57		
vidros	5,0	5,0	2,4	2,84		
metais ferrosos	0,8	0,8	2,3	0,43		
metais não ferrosos	1,6	1,6	0,6	0,92		
têxteis	9,1	9,1	2,6	5,18	14,1	Outros combustíveis
borracha, couro	0,0	0,0	0,7	0,00		
fraldas descartáveis e similares	5,0	5,0	4,0	2,86		
madeira	0,0	0,0	4,7	0,00		
resíduos minerais	1,4	1,4	0,0	0,79	12,7	Outros não combustíveis
outros	11,3	11,3	4,7	6,43		
Total (deve ser 100%)	**100,0**	**100,0**	**100,0**	**57,00**	**100,0**	

5.6.1. Triagem de Seletivos

Considerando a quantidade de resíduos no cenário 2, manteve-se inalterada a rota tecnológica simulada para o cenário 1, porém, com uma quantidade maior de massa dos resíduos sólidos. Os subprodutos e rejeitos separados da triagem em ton/dia podem ser observados na tabela 17.

Tabela 17 - Subprodutos e rejeitos separados da triagem cenário 2 (ton/dia)

Subprodutos e rejeitos separados da triagem (ton/dia)				
	Total	**Seletiva manual**	**Seletiva mecanizada**	**Mistos mecanizada**
papel e papelão	2,73	2,73	0,00	0,00
plástico filme	4,26	4,26	0,00	0,00
plástico rígido	0,89	0,89	0,00	0,00
vidros	1,61	1,61	0,00	0,00
metais ferrosos	0,25	0,25	0,00	0,00
metais não ferrosos	0,52	0,52	0,00	0,00
Total de recicláveis	**10,26**	**10,26**	**0,00**	**0,00**
orgânicos triados	0,00		**Alimentos**	0,00
orgânicos seletivos	22,80		**Verdes**	0,00
rejeitos combustíveis	6,16	6,16	0,00	0,00
rejeitos não combust.	0,68	0,68	0,00	0,00

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

Após esta etapa, há uma separação de 22,8 ton/dia de orgânicos provindos da coleta seletiva, 6,16 ton/dia de rejeitos combustíveis, 0,68 ton/dia de rejeitos não combustíveis e 10,26 ton/dia do total de recicláveis.

5.6.2. Tratamento Biológico – Compostagem.

O resíduo orgânico proveniente da coleta seletiva será destinado a compostagem de forma integral. Obteve-se como subprodutos 2,28 ton/dia de composto para uso nobre e 9,12 ton/dia de composto para uso não nobre. Como resultado de perdas e rejeitos, obteve-se 2,28 ton/dia de rejeito na peneira utilizado como composto para o aterro, enquanto 9,12 ton/dia foi perdido por evaporação (massa perdida para a atmosfera)

5.6.3. Disposição Final – Aterro Sanitário

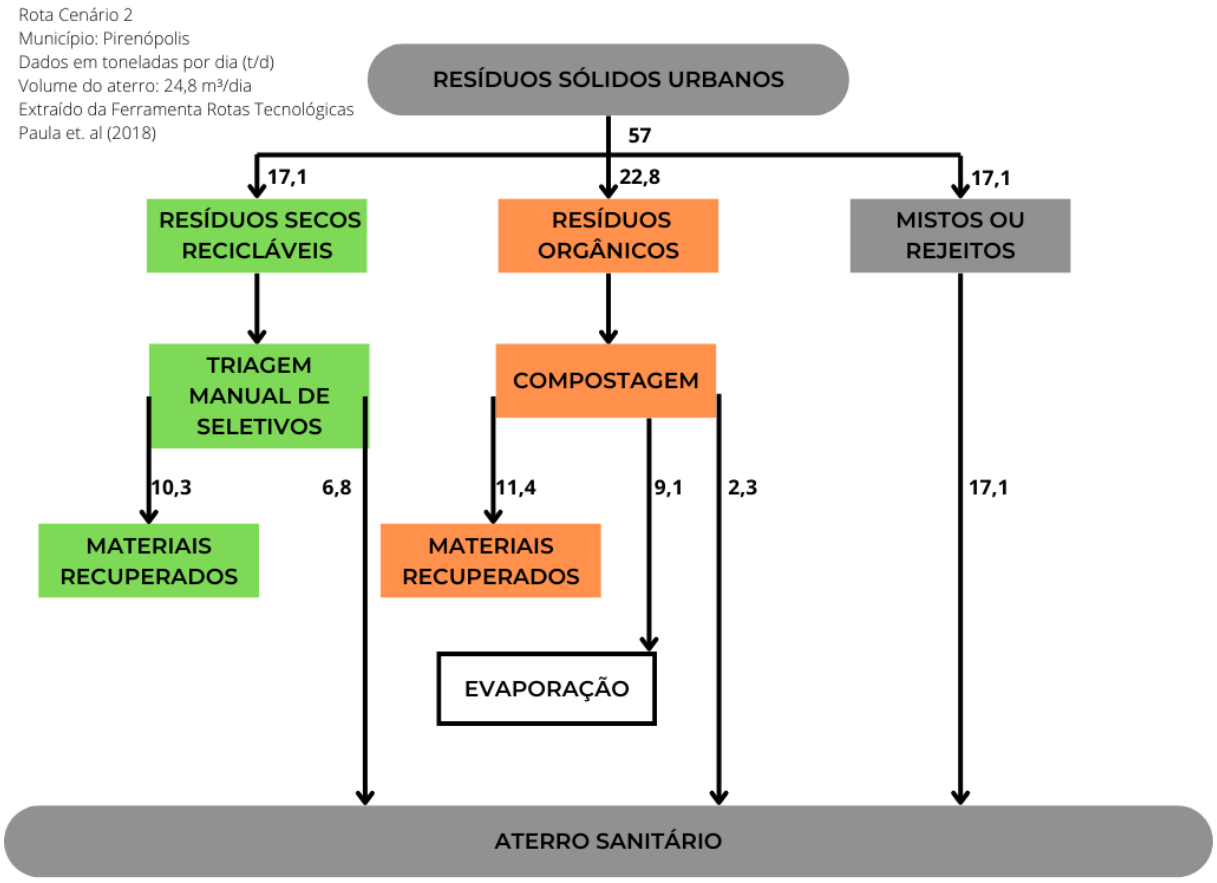
Para o aterro sanitário, foram destinados o material que não foi recuperado da triagem manual de seletivos e dos resíduos orgânicos, somando um total de 26,22 toneladas por dia de resíduos, necessitando um volume de 24,8 m³/dia.

Como subproduto há a opção de geração de energia elétrica, estimada em 817,7 kWh/dia, para a quantidade de resíduo que é recebido para a gravimetria inserida.

Vale ressaltar que, mesmo contabilizando a população turística de Pirenópolis, a rota tecnológica foi muito semelhante ao Cenário 1.

5.6.4. Rota Tecnológica Cenário 2

Figura 19 - Rota tecnológica cenário 2



Fonte: Ferramenta ProteGEEr, Adaptado.

5.7. CENÁRIO 3

De acordo com o SNIS 2020, o município de Pirenópolis não possui Consórcio Intermunicipal regulamentado pela Lei 11.107/2005 que tenha atribuições de gestão ou prestação de serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos. Sendo assim, para o cenário 3, considerando a prestação regionalizada, citada na Lei 14.026/2020 do Novo Marco Legal do Saneamento, que é a modalidade de prestação integrada considerando mais de um município, foi modelado o cenário para Pirenópolis e municípios vizinhos com características parecidas de população, visando maior eficiência e abrindo possibilidades para maior exploração de tecnologias. Para o cenário foi feito o desvio do material que iria para o aterro utilizando o CDR, além da compostagem dos resíduos orgânicos.

De acordo com Silva *et al*. (2021), o Brasil tem grandes oportunidades para utilização do CDR, principalmente no setor cimenteiro, que já tem fomentado discussões no que diz respeito a minimizar os impactos climáticos e econômicos e estuda substituir a fonte energética atual pelo uso do CDR como estratégia no setor, ou seja, o conjunto de municípios pode ter o potencial tanto para comercializar o CDR fino (tamanho < 25mm) quanto o grosso (tamanho < 50 mm).

Os municípios selecionados para este cenário são os mesmos municípios do cenário de Três Unidades regionais da Proposta de Regionalização dos serviços de Água, Esgoto e Resíduos Sólidos da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SEMAD de Goiás, considerando que os resíduos serão encaminhados para a CTRS de Águas Lindas de Goiás, junto com outros 7 municípios próximos, totalizando uma população de 511704 habitantes, com geração de 407,76 ton/dia.

Não foram encontrados dados de composição gravimétrica para cada município, sendo, portanto, utilizada a composição gravimétrica de Pirenópolis como base para o trabalho.

A estimativa da geração per capita de resíduos sólidos urbanos foi feita utilizando a média dos municípios selecionados, que é de 0,8 kg/hab.dia, formando a nova composição gravimétrica para o cenário 3 (Tabela 18).

Tabela 18 - Composição Gravimétrica Cenário 3

Componentes	Composição — base úmida (%)			Material	Agrupamentos	
	Dados do usuário	Utilizados nos cálculos	Padrão Brasil	ton/dia	(%)	Tipo
resíduos de alimentos	29,5	29,5	48,4	120,13	41,5	Orgânicos
resíduos verdes (jardins e parques)	12,0	12,0	3,0	48,97		
papel, papelão	8,5	8,5	13,1	34,46	31,8	Recicláveis
plástico filme	13,2	13,2	8,9	53,78		
plásticos rígidos	2,8	2,8	4,6	11,25		
vidros	5,0	5,0	2,4	20,35		
metais ferrosos	0,8	0,8	2,3	3,10		
metais não ferrosos	1,6	1,6	0,6	6,56		
têxteis	9,1	9,1	2,6	37,02	14,1	Outros combustíveis
borracha, couro	0,0	0,0	0,7	0,00		
fraldas descartáveis e similares	5,0	5,0	4,0	20,47		
madeira	0,0	0,0	4,7	0,00		
resíduos minerais	1,4	1,4	0,0	5,67	12,7	Outros não combustíveis
outros	11,3	11,3	4,7	46,00		
Total (deve ser 100%)	**100,0**	**100,0**	**100,0**	**407,76**	**100,0**	

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

5.7.1. Triagem de Seletivos

Como há uma quantidade maior que 50 ton/dia para coleta de mistos/rejeitos e coleta seletiva de recicláveis, então, de acordo com Paula et. al (2018), já se torna possível a triagem mecanizada de seletivos além da mecanizada de mistos. Como a ferramenta não aceita triagem 100% manual para quantidades maiores de 100 ton/dia na triagem dos seletivos, o processo foi feito com 50% da triagem dos seletivos feito de forma mecanizada, totalizando 61,16 ton/dia, criando oportunidade para a realocação dos catadores presentes nos lixões das cidades, com capacidade de triagem de também 61,16 ton/dia de forma manual. Já a triagem dos resíduos da coleta de mistos foi considerada como sendo feita de forma 100% mecanizada. Os subprodutos e rejeitos separados da triagem em ton/dia podem ser observados na tabela 19.

Tabela 19 - Subprodutos e rejeitos separados da triagem Cenário 3 (ton/dia)

Subprodutos e rejeitos separados da triagem (ton/dia)				
	Total	**Seletiva manual**	**Seletiva mecanizada**	**Mistos mecanizada**
papel e papelão	20,67	9,76	9,76	1,15
plástico filme	32,27	15,24	15,24	1,79
plástico rígido	6,75	3,19	3,19	0,37
vidros	12,21	5,77	5,77	0,68
metais ferrosos	1,86	0,88	0,88	0,10
metais não ferrosos	3,94	1,86	1,86	0,22
Total de recicláveis	**77,70**	**36,70**	**36,70**	**4,31**
orgânicos triados	5,09		**Alimentos**	3,62
orgânicos seletivos	163,10		**Verdes**	1,48
rejeitos combustíveis	104,64	22,02	22,02	60,60
rejeitos não combust.	57,22	2,45	2,45	52,33

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

Após esta etapa, há uma separação de 163,10 ton/dia de orgânicos provindos da coleta seletiva, 104,64 ton/dia de rejeitos combustíveis, 57,22 ton/dia de rejeitos não combustíveis e 77,70 ton/dia do total de recicláveis.

5.7.2. Produção de CDR

Após a triagem, os resíduos foram disponibilizados para CDR conforme a Tabela 20, para produção do CDR TM – Tratamento Mecânico com rejeitos secos, pois os orgânicos serão encaminhados para compostagem. Metade dos resíduos disponíveis serão destinados para produção de CDR fino, e o restante, para CDR grosso, considerando que há mercado para ambos no Brasil.

Tabela 20 - Resíduos Disponíveis para CDR Cenário 3

Produção de CDR	
Resíduos disponíveis para CDR	
Rejeitos combustíveis seletivos (man.) (ton/dia)	22,02
Rejeitos combustíveis seletivos (mecan.) (ton/dia)	22,02
Rejeitos combustíveis triag. mecan. mistos (ton/dia)	60,60

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

Como resultado, haverá uma produção de cerca de 44,47 ton/dia para CDR fino, e 44,47 ton/dia para CDR grosso, com 13,08 ton/dia de rejeito para o aterro e 2,62 ton/dia de perda para evaporação/secagem.

5.7.3. Tratamento Biológico - Compostagem

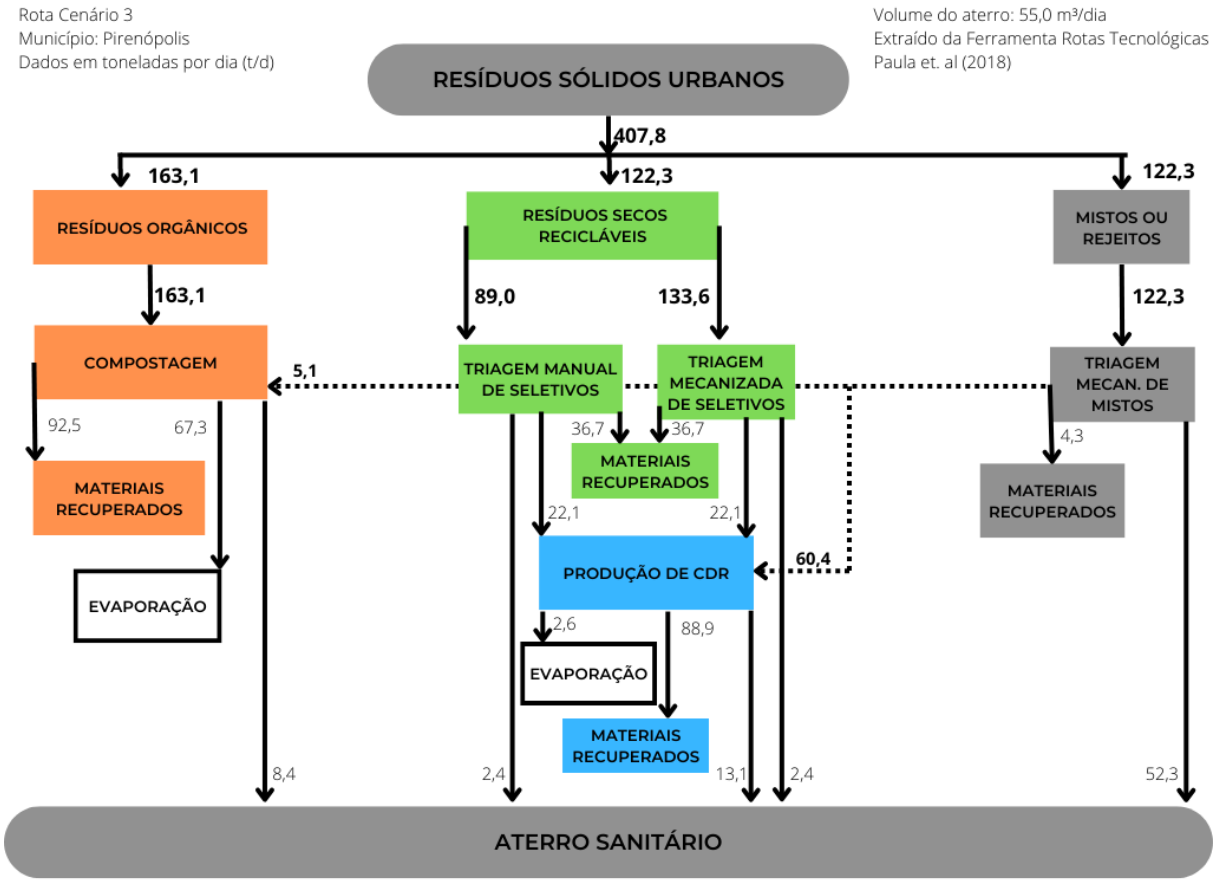
O resíduo orgânico proveniente da coleta seletiva será destinado a compostagem de forma integral, sendo estimados 18,5 ton/dia de compostagem para uso nobre referente a parte de maior qualidade do resíduo coletado, e 74,01 ton/dia para uso não nobre. Como resultado de perdas e rejeitos, obteve-se 8,41 ton/dia de rejeito na peneira utilizado como composto para o aterro, e 67,28 ton/dia foi perdido por evaporação (massa perdida para a atmosfera).

5.7.4. Disposição Final – Aterro Sanitário

Para o aterro sanitário, foram destinados o material que não foi recuperado no sistema, somando um total de 78,71 toneladas por dia de resíduos, necessitando um volume de 55 m³/dia.

5.7.5. Rota tecnológica cenário 3

Figura 20 - Rota tecnológica cenário 3



Fonte: Ferramenta ProteGEEr, Adaptado.

5.8. VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DA ROTA TECNOLÓGICA

Para a análise de viabilidade da implantação da rota tecnológica, há a necessidade de avaliar a implantação do aterro sanitário, destinação dos rejeitos nos 3 cenários. Para isto, Mariano *et* al. (2020) fez uma comparação de análise de viabilidade econômica de um Consórcio Intermunicipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (CIGIRS) composto por municípios de pequeno porte no estado de Goiás com características parecidas com Pirenópolis, são eles Cachoeira de Goiás com 1516 habitantes, Firminópolis com 9811 habitantes, São Luís M. Belos com 31344 habitantes e Turvânia com 4442 habitantes. Como resultado do estudo, o consórcio obteve melhor custo de implantação e operação de um aterro sanitário em comum, com um custo de operação em cerca de R$: 249,65 por tonelada de RSU, enquanto para o

município de Firminópolis, por exemplo, ficou com um custo estimado em R$ 988,41 por tonelada de RSU.

Além disso, estudos da CETEC/MMA (2019) nos traz resultados de que um aterro sanitário, para operar sem problemas de ordem econômico-financeira, deve receber ao menos entre 100 ton/dia e 150 ton/dia, o que não acontece em nenhum dos três cenários. Sendo assim, foi feita a simulação de mais um cenário, agora, considerando a população do entorno do Distrito Federal, região de planejamento do Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS) de Goiás onde o município de Pirenópolis está inserido.

A microrregião do entorno do DF é composta pelos municípios da tabela 21, com uma estimativa de geração diária de 680,72 ton/dia, totalizando um percentual de 16,65% do total gerado no estado de Goiás. (PERS, 2017)

Tabela 21 - Municípios Microrregião Entorno do DF

Municípios microrregião entorno do DF	
Município	**Habitantes**
Abadiânia	15757
Água fria de Goiás	5090
Águas Lindas de Goiás	159378
Alexânia	23814
Cabeceiras	7354
Cidade Ocidental	55915
Cocalzinho de Goiás	17407
Corumbá de Goiás	10361
Cristalina	46580
Formosa	100085
Novo Gama	95018
Mimoso de Goiás	2685
Luziânia	174531
Vila Boa	4735
Valparaíso de Goiás	132982
Santo Antônio do Descoberto	63248
Planaltina	81649
Padre Bernardo	27671
Pirenópolis	23006

Fonte: IBGE, 2010. Adaptado.

5.9. CENÁRIO 4

Selecionando os municípios da Tabela 22, foi gerada uma Rota Tecnológica para a microrregião do entorno de Brasília. Para tal, foi utilizada a composição gravimétrica de Pirenópolis como base para o trabalho.

A estimativa da geração per capita de resíduos sólidos urbanos utilizada foi a mesma do PERS (2017), de 680,72 ton/dia para um total de 1.047.266 habitantes, formando assim a composição gravimétrica para o cenário 4 (Tabela 23).

Tabela 22 - Composição Gravimétrica Cenário 4

Componentes	Composição — base úmida (%)			Material	Agrupamentos	
	Dados do usuário	Utilizados nos cálculos	Padrão Brasil	t/d	(%)	Tipo
resíduos de alimentos	29,5	29,5	48,4	200,54	41,5	Orgânicos
resíduos verdes (jardins e parques)	12,0	12,0	3,0	81,75		
papel, papelão	8,5	8,5	13,1	57,52	31,8	Recicláveis
plástico filme	13,2	13,2	8,9	89,79		
plásticos rígidos	2,8	2,8	4,6	18,79		
vidros	5,0	5,0	2,4	33,97		
metais ferrosos	0,8	0,8	2,3	5,17		
metais não ferrosos	1,6	1,6	0,6	10,96		
têxteis	9,1	9,1	2,6	61,81	14,1	Outros combustíveis
borracha, couro	0,0	0,0	0,7	0,00		
fraldas descartáveis e similares	5,0	5,0	4,0	34,17		
madeira	0,0	0,0	4,7	0,00		
resíduos minerais	1,4	1,4	0,0	9,46	12,7	Outros não combustíveis
outros	11,3	11,3	4,7	76,79		
Total (deve ser 100%)	**100,0**	**100,0**	**100,0**	**680,72**	**100,0**	

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

5.9.1. Triagem dos Seletivos

Assim como no Cenário 3, há uma quantidade maior que 50 ton/dia para coleta de mistos/rejeitos e coleta seletiva de recicláveis, então, de acordo com Paula et. al (2018), já se torna possível a triagem mecanizada de seletivos além da mecanizada de mistos. Como a ferramenta não aceita triagem 100% manual para quantidades maiores de 100 ton/dia na triagem dos seletivos, o processo foi feito com 55% da triagem dos seletivos feito de forma mecanizada, totalizando 204,22 ton/dia de massa disponível. Já a triagem dos resíduos da coleta de mistos foi considerada como sendo feita de forma 100% mecanizada. Os subprodutos e rejeitos separados da triagem em ton/dia podem ser observados na tabela 23.

Tabela 23 - Subprodutos e rejeitos separados da triagem Cenário 4

Subprodutos e rejeitos separados da triagem (ton/dia)				
	Total	**Seletiva manual**	**Seletiva mecanizada**	**Mistos mecanizada**
papel e papelão	34,51	14,67	17,93	1,91
plástico filme	53,87	22,90	27,99	2,99
plástico rígido	11,27	4,79	5,86	0,62
vidros	20,38	8,66	10,59	1,13
metais ferrosos	3,10	1,32	1,61	0,17
metais não ferrosos	6,58	2,80	3,42	0,36
Total de recicláveis	**129,72**	**55,14**	**67,39**	**7,19**
orgânicos triados	8,51		**Alimentos**	6,04
orgânicos seletivos	272,29		**Verdes**	2,46
rejeitos combustíveis	174,68	33,08	40,43	101,16
rejeitos não combust.	95,53	3,68	4,49	87,36

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

Após esta etapa, há uma separação de 272,29 ton/dia de orgânicos provindos da coleta seletiva, 174,68 ton/dia de rejeitos combustíveis, 95,53 ton/dia de rejeitos não combustíveis e 129,72 ton/dia do total de recicláveis.

5.9.2. Produção de CDR

Após a triagem, os resíduos foram disponibilizados para CDR conforme a Tabela 24, para produção do CDR TM – Tratamento Mecânico com rejeitos secos, pois os orgânicos serão encaminhados para compostagem. Metade dos resíduos disponíveis serão destinados para produção de CDR fino, e o restante, para CDR grosso.

Tabela 24 - Resíduos Disponíveis Para CDR Cenário 4

Produção de CDR	
Resíduos disponíveis para CDR	
rejeitos combustíveis seletivos (man.) (ton/dia)	33,08
rejeitos combustíveis seletivos (mecan.) (ton/dia)	40,43
rejeitos combustíveis triag. mecan. mistos (ton/dia)	101,16

Fonte: Ferramenta ProteGEEr.

Como resultado, haverá uma produção de cerca de 74,24 ton/dia para CDR fino, e 74,24 ton/dia para CDR grosso, com 21,84 ton/dia de rejeito para o aterro e 4,37 ton/dia de perda para evaporação/secagem.

5.9.3. Tratamento Biológico - Compostagem

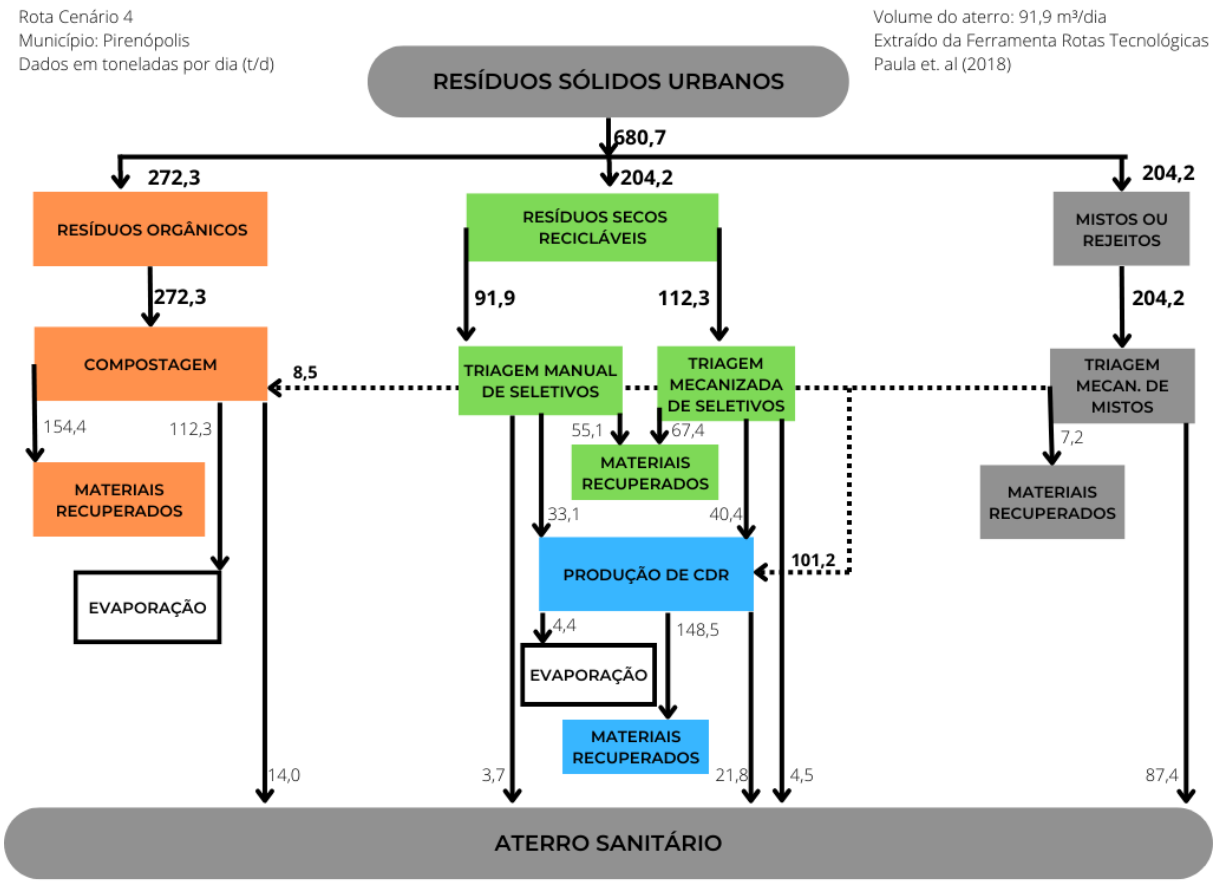
O resíduo orgânico proveniente da coleta seletiva será destinado a compostagem de forma integral, sendo estimados 30,89 ton/dia de compostagem para uso nobre referente a parte de maior qualidade do resíduo coletado, e 123,55 ton/dia para uso não nobre. Como resultado de perdas e rejeitos, obteve-se 14,04 ton/dia de rejeito na peneira utilizado como composto para o aterro, e 112,32 ton/dia foi perdido por evaporação (massa perdida para a atmosfera).

5.9.4. Disposição Final – Aterro Sanitário

Para o aterro sanitário, foram destinados o material que não foi recuperado no sistema, somando um total de 131,4 toneladas por dia de resíduos, necessitando um volume de 91,9 m³/dia.

5.9.5. Rota Tecnológica Cenário 4

Figura 21 - Rota Tecnológica Cenário 4



5.10. REVISÃO DO PMGIRS

À luz da Lei nº 12.305/2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, e do Decreto nº 10.936/2022 que regulamenta a lei, o trabalho aqui apresentado indica uma revisão do PMGIRS do município de Pirenópolis, principalmente em relação à composição gravimétrica do município, formatação do documento, entre outros. Serão demonstrados alguns pontos em que há indicações de mudanças.

Indica-se adotar o padrão ABNT para a formatação do documento, a presença de sumário, lista de figuras e tabelas, por exemplo, pode facilitar para o leitor.

Sobre a composição gravimétrica, nas páginas 8 e 9 do documento há a tabela de resíduos caracterizados, percentual e peso encontrados, e na coluna do peso em Kg há o uso de pontuação incorreta, hora utilizando vírgula, hora ponto. Sendo assim, há a necessidade de revisão, como observado na figura 22.

Figura 22 - Tabela de Composição Gravimétrica Retirada do PMGIRS

Resíduos Caracterizados, percentual e peso encontrados			
Município	**Pirenópolis**	**Data 06/2018**	**TOTAL**
Componentes			**Porcentagem**
Restos de Alimentos			29,46%
Restos de Podas			12,01%
Coco			2,02%
Papel Reciclável			1,42%
Papelão			6,01%
Tetra Pack			1,02%
Plástico Mole			9,01%
Plástico Duro			2,76%
Pet			4,18%
Ferro			0,76%
Lata de Alumínio			0,82%
Metal			0,79%
Vidro			4,99%
Lixo de banheiro			5,02%
Trapo			9,08%
Entulho			0,58%
Outros			2,22%
Terra/Areia			0,81%
Refugo Final			7,04%
Total			100,00%

Fonte: PMGIRS (2018)

Como observado na tabela 11, a quantidade de resíduos sólidos carregados por caminhão difere dos estudos de Correia *et* al. (2018), sendo indicado um novo cálculo de resíduos por caminhão, ou a periodicidade de coleta feita por eles para justificar a quantidade diária.

Na página 9 do documento há a seguinte afirmação: “Semanalmente são coletadas em Pirenópolis, em média, 448 toneladas de resíduos sólidos comuns.”, assim como na página 16: “A tabela abaixo busca consolidar informações aproximadas relacionadas às quantidades de materiais recicláveis encontrados no lixo, (considerando 448 toneladas coletadas por semana)”. Já na página 60, há uma incongruência, dizendo, no memorial de cálculo dos custos de operação da Coleta Convencional, que a quantidade de resíduos sólidos coletado é de 448 toneladas por mês. Indica-se uma revisão para sanar esta incongruência e passar para o leitor a real quantidade de lixo coletada, assim como a composição gravimétrica de forma fidedigna.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A definição de uma rota tecnológica para um município, ou um conjunto deles, é uma tarefa complexa e envolve diversas variáveis que influenciam diretamente na quantidade de resíduo que vai para o aterro sanitário como destinação final. Identificar essas variáveis é de suma importância para que haja um aumento da vida útil de um futuro aterro sanitário, visando o encerramento do lixão hoje ativo no município de Pirenópolis. Resultados encontrados na literatura indicam que há a possibilidade de aumentar a vida útil do aterro sanitário desviando o material que iria para essa destinação final para outras tecnologias, como o tratamento biológico, produção de CDR, incineração, entre outros, que possuem potencial elevado de geração de energia e insumos que podem hoje ser comercializados no Brasil.

O que foi proposto no trabalho foi atingido através da modelagem de 4 cenários não só especificamente para o município de Pirenópolis, mas também levando em consideração a prestação regionalizada, prevista na Lei nº 14.026/2020 que atualiza o Novo Marco Legal do Saneamento, a partir das propostas de regionalização da SEMAD e do PERS.

Como limitação para o trabalho, somente com a disponibilidade da composição gravimétrica do município de Pirenópolis, os dados podem estar subestimados ou superestimados a depender do porte do município tanto da proposta de regionalização da SEMAD quanto do PERS.

Os resultados deste trabalho, expressos no tópico 5, mostram o grande potencial que o município tem para encerrar seu lixão e fazer o gerenciamento de seus resíduos de forma eficiente, considerando ou não os municípios que estão em seu entorno. Estes resultados, que

foram compilados na tabela 25, apontam para a Rota Tecnológica proposta no Cenário 4, tendo em vista que, apenas neste Cenário, houve a destinação de mais de 100 ton/dia de rejeito para o Aterro Sanitário, conseguindo recuperar cerca de 64% dos resíduos gerados por meio da Reciclagem, Compostagem e CDR, onde os compostos recuperados podem ser reaproveitados ou vendidos no mercado. Já para os cenários 1 e 2, não se torna viável a adoção do aterro sanitário para destinação final, já que a quantidade de resíduos não é suficiente, indicando uma prestação regionalizada. O cenário 3, mesmo considerando a prestação regionalizada, indica que há a necessidade de agregar uma quantidade maior de municípios para que seja viável a adoção do aterro sanitário.

Tabela 25 - Resultados modelagem de cenários

Dados em (ton/dia)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Tratamento Biológico	11,3	22,8	163,1	272,3
Resíduos Secos Recicláveis	8,5	17,1	122,3	204,2
Produção de CDR	-	-	44,2	73,5
Aterro sanitário	**12,98**	**26,22**	**78,71**	**131,4**

Vale ressaltar que, além dos resultados de rota tecnológica, o trabalho indica uma revisão do PMGIRS, visando maiores benefícios para o município, visto que o Plano traz algumas incompatibilidades não só com a bibliografia, mas também, incongruências dentro do próprio documento.

Para futuras pesquisas recomenda-se o estudo da viabilidade econômico-financeira de implementação das tecnologias para benefício do município, como a geração de biogás ou de eletricidade. Além disso, recomenda-se a utilização não só da Ferramenta Rotas e Custos para estimar os custos envolvidos para a construção de cada tecnologia, mas também de outras ferramentas disponibilizadas pelo ProteGEEr, como o roteiro de encerramento de lixão.

7. REFERÊNCIAS

ARAUJO, N. L. *et al.* **Gestão Integrada de Resíduos Sólidos:** Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. 15. Ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Administração Municipal – IBAM. 2001 p. 1-204.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 10004. **Resíduos Sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 20 nov. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 13591. **Compostagem.** Rio de Janeiro: ABNT, 29 abr. 1996.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**: Aspectos Ambientais. 1. ed. São Paulo SP: Oficina de Textos, 2014. p. 1-222.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022**. Regulamenta a Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Diário Oficial da União 2022;

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Diário Oficial da União 2020;

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e dá outras providências.** Diário Oficial da União 2020;

CORREIA *et al*. OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA MUNICIPAL DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS: ESTUDO DE CASO. **XIV SIBESA,** Fortaleza, v. 1, n. 14, p. 1-6, jun./2018. Disponível em: https://abesnacional.com.br/XP/XP-EasyArtigos/Site/Uploads/Evento40/TrabalhosCompletosPDF/III-054.pdf. Acesso em: 26 set. 2022.

ECOOIDEIA *et al*. PMGIRS: Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. **Programa Água Brasil**, Pirenópolis, v. 1, n. 1, p. 1-106, mar. /2015.

GOIÁS. **PLANO ESTADUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE GOIÁS**, Goiás, 2017. Disponível em: https://www.meioambiente.go.gov.br/arquivos/pers_versao_final_forum_de_residuos_solidos.pdf. Acesso em: 20 set. 2022.

Goiás Turismo. Censo Hoteleiro 2018/2019 Pirenópolis. **OBSERVATÓRIO DO TURISMO ESTADO DE GOIÁS**, Goiás, v. 1, n. 1, p. 1-102, jan./2018. Disponível em: http://www.abihgo.org.br/sitewp/wp-content/uploads/2020/03/censo-piren%C3%B3polis-2018-2019.pdf. Acesso em: 3 set. 2022.

JUCÁ, J. F. T. *et al*. **Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. 1. ed. Pernambuco: UFPE, 2014. p. 1-187.

LEAL, Brauliro G. **Modelagem e Simulação Discreta**. 4. ed. Juazeiro – BA: GNU GCC, 2022. p. 1-178.

MARIANO, Everton; SANTOS, Vanessa; SOUZA, Anselmo. Análise de viabilidade econômica para instalação e operação de aterro sanitário consorciado entre municípios. **TCC**, Goiás, p. 1-16, dez./2020. Disponível em: https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/987. Acesso em: 27 set. 2022.

MELO, L. A. D; SAUTTER, Klaus Dieter; SAUTTER, Klaus Dieter. Estudo de cenários para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos de Curitiba. **Eng Sanit Ambient**, Curitiba, v. 14, n. 4, p. 551-558, out./2009. Disponível em: https://www.scielo.br/j/esa/a/Y6k4B69RQGHXmrGTYD4Bcyb/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 31 mar. 2022.

PAULA, A. S. D; REICHERT, Geraldo Antônio. MANUAL DA FERRAMENTA DE ROTAS E CUSTOS: Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos. **Cooperação Técnica Brasil–Alemanha**, Brasília, v. 1, n. 1, p. 1-223, jun./2021. Disponível em: http://protegeer.gov.br/biblioteca/ferramentas-rsu/46-rotas-tecnologicas-e-custos. Acesso em: 2 fev. 2022.

PREFEITURA DE PIRENÓPOLIS. **História de Pirenópolis**. Disponível em: https://pirenopolis.go.gov.br/historia/. Acesso em: 7 fev. 2022.

PROTEGEER. **Ferramenta Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU**. Disponível em: http://protegeer.gov.br/biblioteca/ferramentas-rsu/46-rotas-tecnologicas-e-custos. Acesso em: 2 fev. 2022.

RODRIGUES *et al*. Combustível Derivado de Resíduos (CDR): Definição, padronização e usos potenciais. **Águas e Resíduos**, São Paulo, v. 2, n. 4, p. 1-9, jan./2017. Disponível em: http://publicacoes.apesb.org/biblioteca/assets/aer.2017.0206.pdf. Acesso em: 30 abr. 2022.

Silva *et al*. **COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS**: Roteiro para avaliação preliminar da produção de combustível derivado de resíduos (CDR). 1. ed. Brasília: MDR, 2021. p. 1-47.

WHITE, P.R.; Franke M.; Handle P. **Integrated Solid Waste Management:** A Life Cycle Inventory. Gaithersburg: Aspen Publisher. 1995 p. 1-546.