

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA, ECONÔMICA-FINANCEIRA E AMBIENTAL
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
(RSU)**

**MUNICÍPIOS DE CORDILHEIRA ALTA, PLANALTO ALEGRE, GUATAMBU, CAXAMBU DO SUL, ÁGUAS DE
CHAPECÓ E SÃO CARLOS – OESTE SANTA CATARINA**



Outubro de 2023



FICHA TÉCNICA

Coordenação e pesquisa

Silvia Valdez

Engenheira Florestal / Mestre em Engenharia Ambiental

Pesquisa

Henrique Brognoli Martins

Engenheiro Civil

Coleta de dados

Éliken Dal Magro

Engenheira Ambiental e Sanitarista / Especialista em Gestão Ambiental e Desenvolvimento Sustentável

Coleta de dados e sistematização

Luísa Peruchi Morandini

Estudante de Engenharia Ambiental e Sanitária

Consultor convidado – Caracterização do RSU

Valdir Eduardo Olivo

Doutor em Engenharia Civil e Ambiental

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	12
2.2 TECNOLOGIAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RSU ..	18
2.2.1 Gás de lixo (GDL)	18
2.2.2 Digestão anaeróbica (biogás, adubo orgânico)	20
2.2.3 Compostagem	25
2.2.4 Incineração	28
2.2.5 Pirólise	32
2.2.6 Hidrogênio verde	34
2.2.7 GCDR – Gás combustível derivado de resíduos	37
2.3 TECNOLOGIAS UTILIZADAS NO BRASIL.....	38
2.3.1 Mafra – SC	39
2.3.2 Boa Esperança – MG	39
2.3.3 Belo Horizonte – MG	41
2.3.4 Seropédica – RJ	42
2.3.5 Campo Grande – MS	42
2.3.6 São José dos Pinhais – PR	43
2.3.7 Nova Iguaçu - RJ	43
2.3.8 Minas do Leão – RS	44
2.3.9 Canhanduba – SC	45
2.3.10 Brasília – DF	45
2.3.11 Uberlândia – MG	45
2.3.12 Bandeirantes – SP	45
2.3.13 Barueri – SP	46
2.3.14 Mauá – SP	47
2.3.15 Ponta Grossa - PR	47
2.4 POLÍTICAS PÚBLICAS.....	48
3. LEGISLAÇÃO APLICÁVEL	50
3.1 LEGISLAÇÃO FEDERAL	50
3.2 LEGISLAÇÃO ESTADUAL	54
3.3 LEGISLAÇÃO MUNICIPAL	56

3.3.1	Águas de Chapecó.....	56
3.3.2	Caxambu do Sul.....	57
3.3.3	Cordilheira Alta.....	57
3.3.4	Guatambu.....	58
3.3.5	Planalto Alegre.....	58
3.3.6	São Carlos.....	59
4.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E DO RSU	60
4.1	MUNICÍPIOS ABRANGIDOS	60
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO RSU	61
4.2.1	Composição gravimétrica da fonte primária	62
4.2.2	Tipificação do RSU.....	64
4.2.3	Poder calorífico	65
5.	PROJEÇÃO DE ACRÉSCIMO DE RESÍDUOS ATÉ 2043	66
5.1	MODELO	66
5.2	POPULAÇÃO	67
5.2.1	Águas de Chapecó.....	68
5.2.2	Caxambu do Sul.....	69
5.2.3	Cordilheira Alta.....	71
5.2.4	Guatambu.....	72
5.2.5	Planalto Alegre.....	74
5.2.6	São Carlos.....	75
5.2.7	Resultado	77
5.3	GERAÇÃO DE RSU <i>PER CAPITA</i> DE 2023 A 2043	78
6.	CUSTO DE COLETA, TRANSPORTE E DESTINAÇÃO DO RSU EM ATERRO SANITÁRIO – CENÁRIO ATUAL/2023	81
7.	SELEÇÃO DE TECNOLOGIA, JUSTIFICATIVA TÉCNICA E DE CUSTOS	81
7.1	CENÁRIO 1 – GASEIFICAÇÃO	83
7.1.1	Alternativa A – Gaseificação em leito fluidizado circulante	84
7.1.2	Alternativa B – Gaseificação em grelha móvel	85
7.2	CENÁRIO 2 – BIODIGESTÃO.....	86
8.	IDENTIFICAÇÃO DO MELHOR LOCAL PARA A INSTALAÇÃO DA USINA DE TRATAMENTO DO RSU	87

8.1	CENÁRIO 1 – USINA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE ÁGUAS DE CHAPECÓ.....	88
8.2	CENÁRIO 2 – USINA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE CAXAMBU DO SUL	88
8.3	CENÁRIO 3 – USINA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE CORDILHEIRA ALTA	89
8.4	CENÁRIO 4 – USINA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE GUATAMBU ..	90
8.5	CENÁRIO 5 – USINA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE PLANALTO ALEGRE.....	90
8.6	CENÁRIO 6 – USINA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS.	91
9.	ASPECTO ECONÔMICO – FINANCEIRO E ESTIMATIVA DE CUSTOS	92
9.1	CUSTO DE TRANSPORTE E DESTINAÇÃO DO RSU.....	92
10.	ASPECTOS AMBIENTAIS E SOCIAIS	93
11.	PRÓXIMAS ETAPAS.....	94
11.1	VISITA TÉCNICA EM USINAS QUE OPERAM COM AS ROTAS TECNOLÓGICAS APRESENTADAS.....	94
11.2	ANÁLISE ECONÔMICO-FINANCEIRA.....	95
11.3	IMPLANTAÇÃO DA UNIDADE GERADORA	96
11.4	CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO.....	97
11.4.1	Cenário 1 - Gaseificação alternativas A e B.....	97
11.4.2	Cenário 2 - Biodigestão	100
11.5	CRONOGRAMA.....	101
12.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

Lista de Tabelas

Tabela 1. Plantas de geração de biogás a partir de RSU ou esgoto.....	24
Tabela 2. População dos municípios abrangidos pelo estudo	61
Tabela 3. Metodologias matemáticas para projeção populacional	67
Tabela 4. Estimativa populacional – Águas de Chapecó.....	68
Tabela 5. Estimativa populacional – Caxambu do Sul.....	69
Tabela 6. Estimativa populacional – Cordilheira Alta	71
Tabela 7. Estimativa populacional – Guatambu.....	73
Tabela 8. Estimativa populacional – Planalto Alegre	74
Tabela 9. Estimativa populacional – São Carlos	75
Tabela 10. Estimativa populacional até o ano de 2043 para os municípios de Águas de Chapecó, Caxambu do Sul, Cordilheira Alta, Guatambu, Planalto Alegre e São Carlos.....	77
Tabela 11. Geração de RSU per capita (kg/hab./dia)	78
Tabela 12. Estimativa de geração de RSU na Região Sul per capita	79
Tabela 13. Soma da quantidade de RSU prospectada por ano até 2023 nos municípios de Águas de Chapecó, Caxambu do Sul, Cordilheira alta, Guatambu, Planalto Alegre e São Carlos.....	80
Tabela 14. Quantidade de RSU coletado nos municípios de Águas de Chapecó, Caxambu do Sul, Cordilheira Alta, Guatambu, Planalto Alegre e São Carlos.....	80
Tabela 15. Valor pago para coleta e disposição de resíduos e o valor arrecadados dos municípios nos municípios de Águas de Chapecó, Caxambu do Sul, Cordilheira Alta, Guatambu, Planalto Alegre e São Carlos	81
Tabela 16. Cenário considerando o a sede da usina no município de Águas de Chapecó	88
Tabela 17. Cenário considerando a sede da usina no município de Caxambu do Sul....	89
Tabela 18. Cenário considerando a sede da usina no município de Cordilheira Alta	89
Tabela 19. Cenário considerando a sede da usina no município de Guatambu	90
Tabela 20. Cenário considerando a sede da usina no município de Planalto Alegre	91
Tabela 21. Cenário considerando a sede da usina no município de São Carlos.....	91
Tabela 22. Resumo da distância e custo estimado em ordem crescente de custo para transporte do RSU até o local hipotético de instalação da usina	92

Lista de Figuras

Figura 1. Evolução típica da produção de biogás em aterro sanitário.....	19
Figura 2. Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.....	21
Figura 3. Esquema dupla-câmara de combustão	29
Figura 4. Maquete digital do Ecopolo para o Caju - Rio de Janeiro	31
Figura 5. Esquema do processo de geração de hidrogênio verde.....	35
Figura 6. Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio	36
Figura 7. Planta de gaseificação de Mafra – SC.....	39
Figura 8. Layout da Usina Termoquímica de Boa Esperança – MG.....	40
Figura 9. Vista aérea da Usina Termoquímica de Boa Esperança – MG	41
Figura 10. Vista aérea da Usina Termoquímica ao lado do lixão do município de Boa Esperança – MG	41
Figura 11. Usina de biogás CSBio Energia.....	43
Figura 12. Usina Biotérmica Minas do Leão.....	44
Figura 13. Esquema de funcionamento do projeto de aproveitamento energético no aterro Bandeirantes – SP	46

Figura 14. Estrutura da usina de biogás.....	48
Figura 15. Mapa de localização dos municípios participantes do estudo.....	60
Figura 16. Composição gravimétrica do RSU no Brasil	63
Figura 17. Modelo e fontes utilizadas para cada variável escolhida	67
Figura 18. Fluxograma do processo de gaseificação.....	84

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Estimativa populacional – Águas de Chapecó	69
Gráfico 2. Estimativa populacional – Caxambu do Sul.....	70
Gráfico 3. Estimativa populacional – Cordilheira Alta	72
Gráfico 4. Estimativa populacional – Guatambu.....	73
Gráfico 5. Estimativa populacional – Planalto Alegre	75
Gráfico 6. Estimativa populacional – São Carlos.....	76

Lista de Quadros

Quadro 1. Quantidade de RSU coletado nos municípios de Águas de Chapecó, Caxambu do Sul, Cordilheira Alta, Guatambu, Planalto Alegre e São Carlos.....	61
Quadro 2. Composição gravimétrica em diferentes municípios do Brasil.....	63
Quadro 3. Valores de PCI em kcal/Kg encontrados em RSU	65
Quadro 4. Estimativa de poder calorífico do RSU dos municípios abrangidos no estudo.	66
Quadro 5. Módulos com estimativa de valor.....	98
Quadro 6. Cronograma	101

Índice de siglas

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ABREN – Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos

AGRAER – Agência de Desenvolvimento Agrário e Extensão Rural

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ART – Anotação de Responsabilidade Técnica

BMU – Ministério Federal do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear da Alemanha

CAPEX – Capital Expenditure (despesas de capitais)

CDF – Certificado de Destinação Final

CDR – Combustível Derivado de Resíduo

CEB – Companhia Energética de Brasília

CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CETRIC – Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Industriais e Comerciais

CGH – Central Geradora de Hidroeletricidade

CH₄ – Metano mercaptanas e outros componentes

CIBIOGÁS – Centro Internacional de Energias Renováveis

CIDEMA – Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Econômico, Social e Meio Ambiente

CNT – Código Tributário Nacional

CO₂ – Dióxido de carbono

CODEMA – Conselho Municipal do Meio Ambiente

CONFEA – Conselho Federal de Engenharia, Arquitetura e Agronomia

CPEA – Centro Paulista de Estudos em Agronegócio

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

CTR – Central de Tratamento de Resíduos

CTRS – Central de Tratamento de Resíduos Sólidos

ELB – Energia Limpa do Brasil

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EUA – Estados Unidos da América

EVTEA – Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica-Financeira e Ambiental
FBRRER – Frente Brasil de Recuperação Energética de Resíduos
FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente
GCDR – Gás combustível derivado de resíduos
GDL – Gás de Lixo
GNV – Gás Natural Veicular
H₂ – Hidrogênio
H₂S – Gás sulfídrico
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IVIG – Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais
kW – Quilowatt
kWh – Quilowatt-hora
LHV – Lower Heating Value
m³ – Metro cúbico
MDL – Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
MJ – Megajoule
MTR – Manifesto de Transporte de Resíduos
MW – Megawatt
N₂ – Nitrogênio
NMOCs – Non Methane Organic Compounds
O₂ – Oxigênio
OPEX – Operational expenditure (despesas operacionais)
PCI – Poder Calorífico Inferior
PEAD – Polietileno de Alta Densidade
PEBD – Polietileno de Baixa Densidade
PET – Tereftalato de Polietileno
PH – Potencial Hidrogeniônico
PMGIRS – Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos
PP – Polipropileno
PPP – Parceria Público-Privada
PS – Poliestireno

PVC – Policloreto de Vinila

RSLP – Resíduos Sólidos, Líquidos e Pastosos

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

SEMAGRO – Secretaria de Meio Ambiente, Desenvolvimento Econômico, Produção e Agricultura Familiar

SLU₁ – Serviço de Limpeza Urbana

SLU₂ – Superintendência de Limpeza Urbana

SMRSU – Serviço Público de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos

TIR – Taxa Interna de Retorno

URE – Unidades de Recuperação Energética

UTE – Usina Termelétrica

UVS – Unidade de Valorização Sustentável

WTE – Waste To Energy

1. APRESENTAÇÃO

O estudo de viabilidade para recuperação energética a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU), visa avaliar a implantação de um sistema de tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU associado à geração de energia nos municípios de abrangência do Consórcio Iberê, sendo estes, Cordilheira Alta, Planalto Alegre, Guatambu, Caxambu do Sul, Águas de Chapecó e São Carlos, no oeste de Santa Catarina, exceto Chapecó.

Este estudo visa à identificação das tecnologias disponíveis, análise das possibilidades de geração de energia elétrica e/ou produção de gás para atividades industriais, culminando com os subsídios para a escolha da tecnologia mais apropriada às condições dos municípios que os integra.

A Ambientalis Engenharia foi contratada por meio do processo licitatório n.º 04/2022 e contrato administrativo n.º 001/2023, firmado no dia 13 de abril de 2023. A ordem de serviço 001/2023, determina o início dos trabalhos no dia 25/04/2023 com o prazo de execução de 180 dias. A responsabilidade técnica dos serviços supracitados está registrada na anotação de responsabilidade técnica – ART n.º 9007560-8.

Importante considerar que a premissa desse estudo é a de destinar os resíduos recicláveis para os catadores de materiais recicláveis devidamente organizados, portanto, não inclui os recicláveis, que possui alto poder calorífico para ser convertido em energia.

O presente estudo, em seu capítulo 2 traz o estado da arte do uso de RSU para a geração de energia, contendo 15 experiências de municípios brasileiros, como boas práticas relacionadas ao tema, apresenta ainda como as políticas públicas têm afetado a questão.

O arcabouço legal que versa sobre a matéria é apresentado no nível federal, estadual e municipal no capítulo 3.

O capítulo 4 apresenta a caracterização da área de estudo, bem como dados técnicos da caracterização do RSU.

Este estudo levou em conta a projeção de incremento ou decréscimo na população dos municípios abrangidos pelo estudo nos próximos 20 anos, conforme apresentado no capítulo 5.

O custo atual de coleta, transporte e destinação final nos aterros sanitários do RSU produzido nos municípios é apresentado no capítulo 6.

Duas rotas tecnológicas foram propostas para geração de energia a partir de RSU, sendo os seus detalhamentos apresentados no capítulo 7. Destaca-se que tais rotas foram

apresentadas em forma de cenário e uma delas se subdivide em duas alternativas tecnológicas, relacionadas ao volume de resíduos.

Uma modelagem foi apresentada para a tomada de decisão do local de instalação da usina, considerando a possibilidade de sua instalação em cenários logísticos que simulam 6 opções, sendo cada uma delas considerando a base da usina/destino do RSU em um dos municípios abrangidos pelo estudo, tendo o transporte do RSU originado nos demais municípios. O capítulo 8 trata deste tema.

É considerada a perspectiva econômico-financeira, bem como os aspectos ambientais e sociais relevantes para a tomada de decisão final, conforme apresentados nos capítulos 9 e 10, respectivamente.

As etapas propostas subsequentemente a conclusão do estudo é apresentada no capítulo 11 e uma importante lista de referências bibliográficas, apresentada no capítulo 12, encerra o estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As possibilidades e trajetórias da geração de energia elétrica utilizando as tecnologias existentes para converter os resíduos sólidos urbanos (RSU) em energia, considerando o ordenamento legal existente e sua viabilidade socioeconômica, são tratadas neste estudo.

Além disso, trata de apresentar para o cenário local, uma alternativa mais adequada para disposição destes resíduos, sabendo que é necessário compatibilizar os requisitos ambientais com as disponibilidades econômicas e insumos da região.

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Estudos apresentados no Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022 (ABRELPE, 2022), mostrou estar em curso novas dinâmicas sociais, que resultam em influência direta nos processos de consumo, descarte e geração de resíduos, evidenciando a necessidade de uma nova abordagem para a gestão dos resíduos domiciliares. Isso decorre tanto por seu papel importante no controle da saúde pública quanto pela necessidade de manejo adequado do volume crescente de material gerado, o que destacou a urgência de novos investimentos que façam frente a essa demanda.

O Brasil gerou, durante o ano de 2022, um total de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de resíduos, o que corresponde a 224 mil toneladas diárias. Com isso, cada brasileiro produziu, em média, 1,043 kg de resíduos por dia (ABRELPE, 2022).

Em termos de geração diária por habitante, as variações regionais mostram-se bastante latentes, com a região Sudeste apresentando uma geração média de 1,234 kg/hab/dia, a maior do país e a região Sul com uma média de 0,776 kg/hab/dia.

Observa-se que nas audiências públicas que ocorrem no país tratando das soluções para a disposição de RSU, os especialistas no assunto ressaltam a necessidade de seu aproveitamento para a geração de energia, atentos para o grande volume de material desperdiçado. Segundo a CETESB (2012), quanto mais desenvolvido for um país, maior deverá ser seus investimentos no tratamento de RSU, enfatizando a pesquisa de novas tecnologias de geração de energia.

No Brasil, a Lei n.º 12.305/10, a qual institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, é um importante ordenamento legal, sendo um instrumento para desenvolver ações que equacionem as questões relativas ao RSU. Essa legislação regulamenta as diretrizes para a gestão integrada e sustentável dos resíduos, promovendo a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final adequada dos resíduos sólidos, bem como a responsabilidade compartilhada entre setor público, setor privado e sociedade civil na busca por soluções mais eficientes e sustentável.

Em 08/12/2021, a ANEEL organizou um seminário¹ que abordou debates realizados em três painéis, tratando de tecnologias e características de fontes de geração de energia elétrica limpa e renovável. Durante o evento, autoridades públicas, bem como especialistas nacionais e internacionais, exploraram temas como o quadro político-regulatório, experiências globais e as tecnologias associadas a essa fonte de energia elétrica sustentável.

A geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos apresenta características técnicas distintas, incluindo a capacidade de fornecer uma geração constante, frequentemente situada em proximidade dos centros urbanos, onde a demanda de carga é alta. Isso contribui para a diminuição das perdas elétricas e a otimização do aproveitamento das redes de transmissão e distribuição já estabelecidas nas áreas de geração.

No Seminário foi ressaltado que o Setor Elétrico desempenha papel fundamental no desenvolvimento de soluções técnicas para a utilização apropriada dos resíduos e na sustentabilidade financeira dos negócios nesse setor. Além disso, contribui para o aproveitamento desse potencial energético, incluindo, mas não se limitando, a gestão

¹ I Seminário Desafios da Geração de Energia com Resíduos Sólidos Urbanos. 8 de dezembro de 2021.
https://www.youtube.com/watch?v=lm_m6HKaIn4

adequada de resíduos em áreas urbanas, o que promove uma maior cidadania, a geração de emprego e renda para todo o ecossistema envolvido nessa atividade, abrangendo cooperativas de coleta e o tratamento de materiais recicláveis.

Após a decisão do Ministério de Minas e Energia, com apoio do Ministério do Meio Ambiente, de incluir a contratação de energia elétrica a partir de Resíduos Sólidos no Leilão A-5 de 2021, o assunto passou a ser mais discutido e incluído em diversas políticas públicas. O vencedor da área de RSU do referido Leilão foi a empresa Foxx URE-BA Ambiental S.A.

Também receberam destaque as iniciativas multilaterais lideradas pelo Brasil, sob a coordenação do Ministério do Meio Ambiente e do Ministério de Minas e Energia, em sintonia com os esforços ambientais globais. Isso inclui os compromissos assumidos pelo Brasil durante a COP 26, como o compromisso de reduzir em 30% as emissões de metano, uma das principais fontes de gases de efeito estufa gerados nos aterros sanitários.

Além disso, Yuri Schmitke, Presidente da ABREN, destaca que a regulamentação atual oferece várias opções para gerar receita a partir da energia proveniente dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Isso inclui mecanismos como o sistema de compensação de energia e a contratação direta por meio de chamadas públicas das empresas distribuidoras, conforme estabelecido na Resolução Normativa n.º 965 da ANEEL, datada de dezembro de 2021. Também foi mencionada a possibilidade de criar usinas híbridas, um tópico regulamentado pela Resolução Normativa n.º 954 da ANEEL, também de dezembro de 2021 (ANEEL, 2021).

A ABREN – Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos objetiva fomentar a recuperação energética de resíduos, enfatizando a destinação dos resíduos sólidos e a geração de energia limpa.

A ANEEL promoveu a Chamada 0014 em 2012, cujo objetivo foi de solicitar propostas para projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) destinados a estabelecer acordos técnicos e comerciais que viabilizassem a geração de energia elétrica a partir do biogás derivado de resíduos e efluentes líquidos de maneira integrada e sustentável. Essa chamada visava criar as condições necessárias para o desenvolvimento de uma base tecnológica e infraestrutura técnica que permitissem a incorporação mais inovadora da geração de eletricidade a partir do biogás à matriz energética nacional, conforme segue:

- Apresentar uma rota tecnológica que utiliza biogás de aterros e/ou biodigestores existentes, bem como gás produzido por um inovador processo

de gaseificação que submete os novos resíduos sólidos urbanos diários a gradientes térmicos.

- Estabelecer uma unidade geradora com capacidade de 200 a 500 kW para demonstrar a viabilidade da rota tecnológica, que combina ambos os gases na produção convencional de eletricidade.
- Desenvolver um modelo que leve em consideração as características locais, a quantidade e a qualidade dos resíduos sólidos urbanos, considerando as possíveis cadeias de reciclagem locais, visando atender aos requisitos socioambientais, econômicos e operacionais.
- Criar metodologias para a integração da geração de energia a partir do biogás na matriz energética nacional, estabelecendo um arranjo técnico e comercial para viabilizar essa inserção.

Muito embora o Setor Elétrico tenha evoluído na questão regulatória, a equação econômica dos projetos ainda é um desafio. É necessária a construção de usinas com custo otimizado, sendo a economia de escala um aspecto importante, de modo a tornar o projeto viável. É possível o aumento da eficiência econômica do projeto por meio da geração combinada de energia elétrica e de calor para diversificação das receitas (ANEEL, 2021).

Em suma, a gestão adequada dos RSU é um desafio global que exige a adoção de abordagens inovadoras e sustentáveis. É fundamental fortalecer a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, promovendo ações integradas de redução, reutilização, reciclagem e destinação adequada dos resíduos, além de fomentar a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias eficientes para o aproveitamento energético dos RSU.

Embora a energia gerada nesta modalidade possa parecer não ser competitiva se comparada aos padrões de geração de energia atuais, esta perspectiva é uma alternativa ambientalmente e economicamente mais adequada que os aterros sanitários, que adotam células de disposição final de resíduos no solo, ainda que, se oportunizado, possam ser complementares. O gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos pode conservar e gerar energia, ou seja, o potencial pode ser armazenado e transformado em energia em horários em que se faça necessário. Segundo a Secretaria de Energia do Estado de São Paulo (2014), caso fosse totalmente aproveitado, estima-se que o potencial de geração de energia de todo o RSU seria suficiente para abastecer em 30% a demanda de energia elétrica atual do Brasil.

A ênfase na reciclagem e no aproveitamento de resíduos sólidos contribui para a redução significativa das emissões de CO₂, atuando na prevenção da poluição ambiental (ANEEL, 2021).

A cadeia de reciclagem não é foco do presente estudo, mas faz-se necessário uma abordagem no tocante ao processo, já que o RSU possui origens diversas e tem passado por diferentes estágios de classificação. Pode ser realizado processos adicionais de separação, para ajudar a transformação deste material num combustível derivado de resíduos.

Em países desenvolvidos, abordagens eficazes no gerenciamento de resíduos têm oferecido soluções para enfrentar esse desafio, permitindo, em particular, a produção de eletricidade e/ou a utilização do calor gerado como um recurso para a indústria. Além disso, essas práticas valorizam-se pelos subprodutos resultantes e pela diminuição da necessidade de áreas para a disposição final de resíduos.

Para efeitos de contextualização internacional é apresentado neste estudo a experiência de apenas dois países, dentre os tantos que possuem importantes rotas tecnológicas para o RSU, como referência, a Alemanha e a Suécia, embora outros também tenham posição importante como referência, tendo em vista que a proposta deste estudo é potencializar as iniciativas bem sucedidas localmente, nacionalmente, no porte que efetivamente é buscado para o conjunto de municípios abrangidos pelo estudo, mas não se limitando a eles, tendo em vista que poderão ser incorporados outros municípios e tipos de resíduos, caso se comprove com estudo complementares, sua viabilidade.

A experiência da Alemanha e da Suécia é apresentada a seguir:

A Alemanha é considerada referência no tratamento dos RSU, em especial na incineração para geração de energia e alavancou as ações na Europa em especial na Comunidade Europeia. Sasse (1996) apresenta algumas alternativas desenvolvidas na Alemanha para lidar com os resíduos, discute suas dificuldades e êxitos. Salienta o estudo que este conhecimento evidencia que as questões ambientais passaram a ser, juntamente com o desemprego, o crime e o desenvolvimento econômico, uma das maiores preocupações dos eleitores ao tomar sua decisão sobre seus governantes.

A primeira usina totalmente automática utilizando as embalagens como combustíveis foi implementada em 1997, perto de Aachen, como um sistema piloto, e a primeira usina industrial veio em seguida, em 1999, em Hannover.

Assim, a Alemanha, passou a ser referência em incineração. Na zona rural de Munique, o incinerador de Geiselbullach é considerado um modelo de eficiência na

queima do resíduo e no aproveitamento da energia gerada. O sistema de limpeza de gases utiliza membrana artificial que retém boa parte dos gases, com controle da quantidade de toxinas produzidas.

De acordo com informações do Ministério Federal do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear da Alemanha (BMU), o país possui mais de 400 instalações de aproveitamento de energia de resíduos, que criaram para a produção de eletricidade e calor. Essas instalações são responsáveis por transformar cerca de 18 milhões de toneladas de resíduos em energia, fornecendo eletricidade suficiente para abastecer mais de 5 milhões de residências. Além disso, a Alemanha tem se empenhado na implementação de tecnologias avançadas, como a gaseificação de resíduos sólidos, visando aumentar a eficiência energética e reduzir ainda mais as emissões de gases de efeito estufa (BMU, 2023).

Na Suécia, a cidade de Borås apresenta um exemplo de gestão de RSU onde a maior parte dos resíduos sólidos urbanos gerados pela população de aproximadamente 64 mil habitantes é reciclada, tratada biologicamente ou transformada em energia (biogás), que abastece a maioria das casas, estabelecimentos comerciais e a frota de 59 ônibus que integram o sistema de transporte público da cidade. Em função disso, o descarte de resíduos no município sueco é quase nulo e seu sistema de produção de biogás se tornou um dos mais avançados da Europa.

O modelo de gestão de resíduos sólidos, adotado pela cidade, integra comunidade, governo, universidade e instituições de pesquisa e começou a ser implementado a partir de meados de 1995, ganhando maior impulso em 2002, com o estabelecimento de uma legislação que banuiu a existência de aterros sanitários nos países da União Europeia.

Além do exemplo em Borås, todo o país tem investido em tecnologias avançadas de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos. Atualmente, mais de 50% dos resíduos produzidos na Suécia são transformados em energia, fornecendo eletricidade e calor para milhões de pessoas. Através de instalações de incineração de resíduos, o país gera eletricidade suficiente para abastecer cerca de 250 mil residências. Além disso, a Suécia é líder na produção de biogás a partir de resíduos orgânicos, utilizados como combustível para veículos e como fonte de energia em diversos setores (WBA, 2023).

2.2 TECNOLOGIAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RSU

Apresenta-se a seguir, os métodos para a geração de energia a partir de resíduos sólidos sendo estas a de gás de resíduos, digestão anaeróbica, compostagem, incineração, pirólise, gás combustível derivado de resíduos e hidrogênio.

2.2.1 Gás de lixo (GDL)

Segundo Lima (1995), a conversão biológica dos resíduos como recuperação de energia pode ser definida como “um processo de decomposição ou de transformação da matéria orgânica, por ação de microrganismos, em substâncias mais estáveis, como o dióxido de carbono, água, gás metano, gás sulfídrico e outros componentes minerais”.

Já a EPE (2014) afirma que a tecnologia de aproveitamento do gás de lixo (GDL), ou biogás produzido nos aterros (*landfillgas*), é considerada o uso energético mais simples dos RSU, podendo ser aplicada a curto e médio prazos para os gases produzidos na maioria dos aterros já existentes. Afirma também, que este processo consiste na recuperação do biogás oriundo da decomposição anaeróbica da fração orgânica de RSU, por ação de microrganismos que transformam os resíduos em substâncias mais estáveis, como dióxido de carbono (CO_2), água, metano (CH_4), gás sulfídrico (H_2S), mercaptanas e outros componentes (NMOCs – non methane organic compounds).

A geração de biogás ocorre através de quatro fases características: durante a fase aeróbica, ocorre a liberação de dióxido de carbono (CO_2), porém, há um alto nível de nitrogênio (N_2) presente, que diminui conforme se avança para as fases 2ª e 3ª do processo. Quando o oxigênio (O_2) se esgota, cria-se um ambiente anaeróbico com uma significativa quantidade de CO_2 e uma pequena quantidade de hidrogênio (H_2) gerada. Na fase anaeróbica subsequente, tem início a produção de metano (CH_4), acompanhada pela diminuição na emissão de CO_2 . Na fase final desse processo, observa-se uma produção quase constante de CH_4 , CO_2 e N_2 .

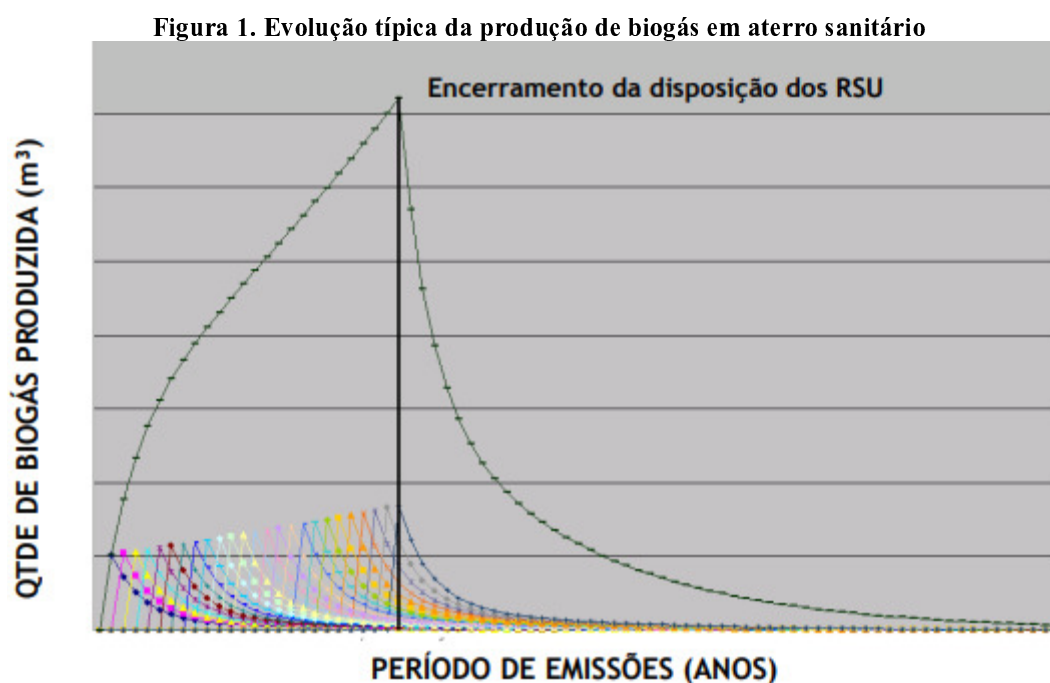
Em termos de composição, o GDL consiste em uma mistura com proporções molares aproximadas de 40% a 55% de metano, 35% a 50% de dióxido de carbono e 0% - 20% de nitrogênio. Seu valor energético varia entre 14,9 MJ/m³ e 20,5 MJ/m³, equivalente a cerca de 4.800 kcal/m³ (CETESB, 2006).

Em função disso existe um grande impacto em termos de efeito estufa, qual seja, o não aproveitamento do GDL, por ser o gás metano, principal componente do biogás, 21 vezes mais potente que o dióxido de carbono em termos de efeito estufa. Por isso, sua simples queima já representa um benefício ambiental em relação à sua emissão.

Considera-se também o efeito positivo ao se evitar a emissão decorrente da queima de combustível fóssil ao se adotar o gás gerado por este processo.

O objetivo do aproveitamento energético do GDL é transformá-lo em energia útil como eletricidade, vapor, combustível para caldeiras, combustível veicular ou para alimentar gasodutos. As tecnologias para maximizar seu valor incluem o uso direto como combustível, produção de energia/cogeração e venda como gás natural. O uso mais simples é como combustível para caldeiras ou processos industriais. O biogás filtrado pode gerar eletricidade por meio de grupos motor-gerador de combustão interna, mesmo com baixo poder calorífico, alcançando rendimentos acima de 35%.

Com o passar do tempo e com acumulação contínua de resíduos, a produção de biogás aumenta. Entretanto, uma vez que o descarte cessa, a produção entra em declínio, apresentando variações de acordo com a composição do resíduo depositado. O padrão de disponibilidade de biogás resulta da soma das quantidades de gás liberadas pelos materiais depositados a cada ano, com emissões que ocorrem em momentos distintos ao longo do tempo. Este processo pode ser ilustrado na Figura 1, onde também é considerada a influência do crescimento populacional e do poder aquisitivo na evolução da quantidade de resíduos sólidos urbanos dispostos. A simulação pode ser realizada através do modelo do IPCC (2006).



O uso econômico do gás gerado é limitado a um período relativamente curto, de até 30 anos, em comparação com a duração total das emissões de gás. É importante

destacar que a queima do gás em motores geradores não elimina a necessidade de tratamento dos gases de exaustão para reduzir poluentes, nem a instalação de dispositivos de queima para gás excedente.

Uma alternativa eficiente energeticamente é a cogeração de eletricidade e energia térmica a partir do GDL, que pode ser utilizada localmente para aquecimento, refrigeração e necessidades industriais, e pode ser transportada para uso em instalações industriais ou comerciais próximas. Ademais, o biogás pode ser tratado e usado como combustível em veículos a gás natural (GNV).

Segundo EPE (2014), de modo geral, o aproveitamento do GDL tem as seguintes vantagens:

- redução dos gases de efeito estufa;
- geração de créditos de carbono;
- utilização para geração de energia ou como combustível;
- redução da possibilidade (remota) de ocorrência de autoignição e/ou explosão pelas altas concentrações de metano.

E apresenta como desvantagens, o seguinte:

- alto custo da planta de aproveitamento do gás, decorrente do tratamento necessário;
- decaimento da disponibilidade de combustível ao longo da vida útil do projeto.

2.2.2 Digestão anaeróbica (biogás, adubo orgânico)

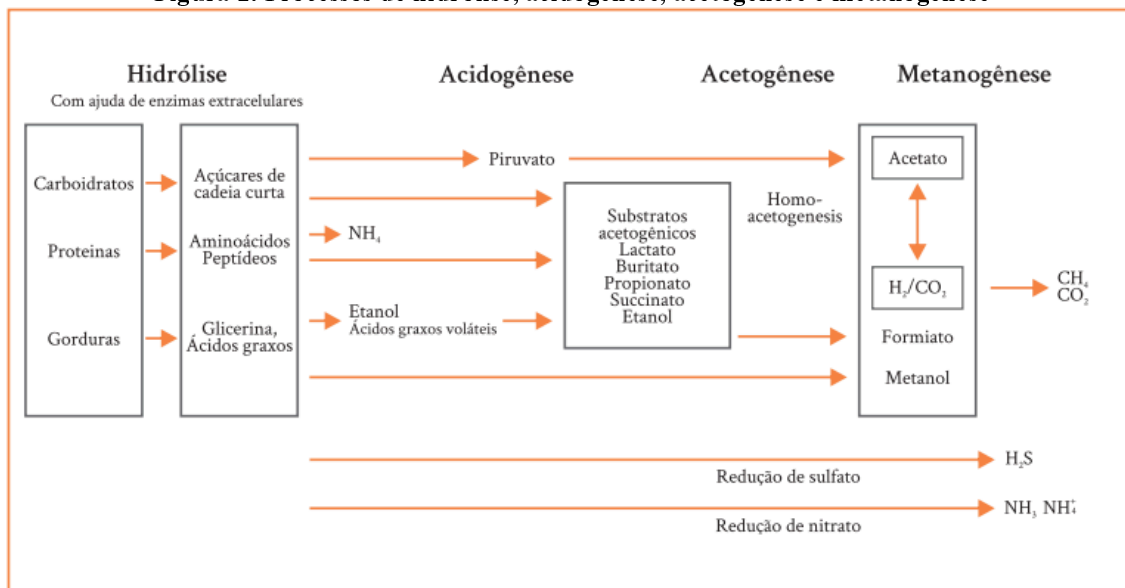
Este processo é uma das formas mais antigas de digestão e ocorre naturalmente na ausência de oxigênio como em estações de tratamento de esgoto e aterros sanitários. O gás obtido durante a digestão anaeróbica, biogás, inclui além do metano e do dióxido de carbono, alguns gases inertes e compostos sulfurosos.

Digestão anaeróbica pode ser definida como a conversão de material orgânico em dióxido de carbono, metano e lodo através de bactérias, em um ambiente pobre em oxigênio que pode ser dividido em quatro fases:

- Hidrólise
- Acidogênese
- Acetogênese
- Metanogênese

A Figura 2 apresenta de forma esquemática as etapas de digestão anaeróbica de matéria orgânica:

Figura 2. Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese



Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2011).

Segundo Henriques (2004), a digestão anaeróbica consiste na degradação do material orgânico na ausência de oxigênio, produzindo, principalmente, 55% do volume de metano (CH_4) e 45% de dióxido de carbono (CO_2) em forma gasosa e um produto composto que serve como condicionador de solo.

A autora segue afirmando que tanto a digestão anaeróbica quanto a compostagem aeróbica oferecem uma rota para recuperação de nutrientes da fração orgânica dos resíduos sólidos municipais. No entanto, compostagem aeróbica requer entre 50 e 75 kWh de energia elétrica gerada por tonelada de resíduos que entram, enquanto a digestão anaeróbica produz entre 75 e 150 kWh de energia elétrica gerada por tonelada de resíduos sólidos.

Existem digestores disponíveis comercialmente com tamanhos variando de 70 m³ a 5000 m³ de capacidade do reator, sendo que o menor digestor faz uso do biogás gerado (i.e., mistura de CH_4 e CO_2) para aquecer o digestor. Os maiores podem apresentar até 2 MW de potência, estando implantados na Europa, onde a Alemanha e Dinamarca lideram este campo tecnológico.

O processo de um estágio simples denota a evolução dos processos de digestão, uma vez que reatores de múltiplos estágios são mais caros e mais complexos de operar. Estes sistemas proveem reatores separados para hidrólise e metanogênese, obtendo

condições mais favoráveis para a digestão de materiais com baixa celulose, como esterco e resíduos de aves (que não são objeto deste estudo).

De forma geral, os processos de digestão anaeróbica apresentam quatro etapas: pré-tratamento, digestão de resíduo, recuperação de gás e tratamento de resíduos.

Ainda segundo Henriques (2004), muitos sistemas de digestão requerem pré-tratamento de resíduos para obter uma carga homogênea, envolvendo separação do material não digerível. Os resíduos recebidos pelo digestor, do processo de digestão anaeróbica, normalmente vêm de coleta seletiva ou de seleção mecânica, de modo que a separação assegura a remoção de materiais indesejáveis ou dos recicláveis, considerando que este estudo não inclui no sistema, os resíduos recicláveis que deverão ser destinados para catadores de materiais recicláveis, devidamente institucionalizados.

Atenção deve ser dada para a separação mecânica quando a coleta seletiva não ocorre totalmente. Neste caso, o material é mais contaminado, tendo como resultado compostos de baixa qualidade.

No interior do digestor, a carga é diluída para atingir o teor de sólidos desejado, de modo a ser mantido pelo tempo de retenção requerido, podendo ser utilizados para diluição de vários líquidos como água limpa, água de esgoto, ou líquido recirculante do efluente de digestor. Um trocador de calor é normalmente requerido para manter a temperatura no vaso de digestão. O biogás obtido na digestão acelerada é depurado para obter gás de qualidade suficiente para passar nos dutos. Caso haja tratamento residual, o efluente do digestor é desidratado e o líquido é reciclado para ser usado na diluição da carga de entrada. O tratamento anaeróbico dos biossólidos resulta em um composto como produto.

A quantidade de biogás produzida depende, entre outros fatores, da tecnologia empregada na digestão e principalmente do composto orgânico. A usina de Tilburg, na Holanda, por exemplo, pode alcançar 106 m³/t de resíduos (75% de restos de alimentos e de jardim e 25% de papel não reutilizável), com um teor de 56% de metano. A Kompogas, fabricante de biodigestores, sugere, como média, o valor de 120 m³ por tonelada de material orgânico. Considerando-se essas referências e a proporção de matéria orgânica na quantidade de RSU gerado por uma comunidade, pode-se afirmar que entre 60 a 75 m³ de biogás são produzidos por tonelada de RSU em um processo de digestão anaeróbica. O biogás produzido por essa solução pode ser transformado em biometano, e o excesso de energia na rede pode ser usado para produzir hidrogênio.

Henriques (2004) *apud* Verstraete (2002), apresenta os tipos mais comuns de digestores anaeróbicos para RSU, que são comparados com base na performance biológica/técnica e na confiabilidade: considerando que podem ser de um estágio, dois estágios e sistema de batelada, sendo este último o mais simples dentre todos os sistemas, além de ser o mais barato. Contudo, sua desvantagem é a demanda de grandes áreas para sua instalação e a baixa produção de biogás em função da baixa efetividade do processo de filtração, que é canalizado e pode acarretar entupimento.

Por sua vez, a maioria das aplicações industriais usa sistema de um estágio que são divididos entre sistemas onde os resíduos são digeridos como recebidos (sistema seco ou alto teor de sólidos) e sistemas onde são misturados com água e formam uma mistura com 12% de sólido denominado úmido (ou baixo teor de sólidos).

Considerando a economicidade, os projetos seco e úmido são equivalentes, pois o projeto seco requer um reator de volume muito menor, que, no entanto, é um equipamento mais caro, e o sistema úmido usa um reator maior, porém, mais barato. A performance biológica do projeto seco tem provado produção confiável para a sua alta concentração de biomassa, controlando alimentação e a distribuição espacial interna. O projeto úmido pode adquirir confiabilidade similar via diluição de potenciais inibidores com água fresca. Do ponto de vista técnico, no entanto, o sistema seco parece mais robusto. As falhas mecânicas frequentes associadas ao projeto úmido são devido à areia, pedras, plásticos e madeira (Verma, 2002).

A gestão das unidades que operam RSU de forma anaeróbica deve ter relação direta, ou seja, uma política única, haja vista que são diversos os produtos transformados, razão pela qual a escolha do reator sempre deve preencher os requisitos iniciais da quantidade e qualidade desses produtos, bem como a necessidade de pós e pré-tratamento.

EPE (2008) traz importantes contribuições em relação às conclusões sobre a utilização desta tecnologia de digestão anaeróbica, afirmando que, assim como na recuperação de gás do aterro, o biogás pode ser consumido diretamente, quando apresenta poder calorífico entre 4.500 e 6.000 kcal/m³, ou tratado para separação e aproveitamento do metano, cujo poder calorífico é semelhante ao gás natural.

Considerando uma eficiência de 35% na conversão de energia térmica para energia elétrica, podem ser obtidos entre 120 e 290 kWh por tonelada de RSU, dependendo do conteúdo energético do resíduo.

Como vantagem está a redução da quantidade de resíduos depositados em aterro sanitário.

Já as principais desvantagens são, segundo Braber (1995):

- a composição dos resíduos pode variar dependendo da localização;
- mistura ineficiente de RSU e outros resíduos não recicláveis pode afetar a eficiência do processo;
- as obstruções de canalização por pedaços maiores de resíduos, principalmente em sistemas contínuos.

De acordo com o Panorama do Biogás no Brasil (CIBIOGAS, 2023) a produção de biogás no Brasil é crescente ao longo dos anos, sendo que até o ano de 2022 foram verificadas 881 plantas ativas, com produção estimada de 2,82 bi Nm³/ano. Destas, 82 utilizam como substrato RSU ou esgoto e produzem cerca de 2,16 bi Nm³/ano. A Tabela 1 traz o número de plantas existentes em cada estado, que utilizam como substrato RSU ou esgoto, além da quantidade de biogás gerada.

Tabela 1. Plantas de geração de biogás a partir de RSU ou esgoto

Estado	Nº de plantas	Produção de biogás (Nm ³ /ano)
Alagoas	1	3,98 Mi
Amazônia	1	26,28 Mi
Bahia	2	80,93 Mi
Ceará	1	109,50 Mi
Espírito Santo	1	19,91 Mi
Goiás	1	3,83 Mi
Maranhão	1	14,45 Mi
Minas Gerais	15	226,65 Mi
Paraíba	1	26,28 Mi
Paraná	10	54,99 Mi
Pernambuco	8	159,45 Mi
Rio de Janeiro	12	411,11 Mi
Rio Grande do Sul	10	132,45 Mi
Santa Catarina	4	43,67 Mi
São Paulo	19	844,80 Mi

Fonte: Adaptado de CIBIOGÁS, 2023.

O estado de Santa Catarina conta com 4 plantas para a geração de biogás, uma delas está localizada no Oeste do estado, no município de Chapecó, e é administrada pela empresa CETRIC, que realiza a captação de biogás gerado por biodigestores e pela decomposição dos resíduos, gerando energia elétrica. Já no município de Itajaí, uma planta de aproveitamento de biogás opera em conjunto com o aterro sanitário Canhanduba, sob a administração da empresa Itajaí Biogás e Energia S.A. Em Biguaçu, a empresa Volia gerencia um aterro sanitário que utiliza o biogás gerado pela decomposição dos resíduos depositados para alimentar seu projeto. A empresa RAC

saneamento, por sua vez, utiliza o biogás para a geração de energia elétrica no município de Içara, aproveitando a decomposição dos resíduos depositados no aterro sanitário e industrial de Poço Coito.

2.2.3 Compostagem

É um processo composto por técnicas aplicadas, de forma a controlar a decomposição de diferentes tipos de resíduos orgânicos, visando a obtenção acelerada de um composto rico em nutrientes para ser utilizado como adubo, que quando adicionado ao solo tem a propriedade de melhorar as suas características físicas, físico-químicas e biológicas. Trata-se de um processo que utiliza os restos orgânicos para ser incorporado no solo, favorecendo a produtividade. Segundo Kiehl (1985), “é uma técnica idealizada para se obter mais rapidamente e em melhores condições, a desejada estabilização da matéria orgânica.”

O processo de compostagem é realizado sobrepondo os resíduos orgânicos em pilhas ou leiras, onde se realizarão a fermentação em duas fases distintas, que segundo Pereira Neto (1989) são descritas abaixo:

- **Digestão:** é a primeira etapa onde acontece a fermentação inicial, com duração de 25 a 35 dias, decompondo o resíduo orgânico, por processo anaeróbio, transformando-os em compostos bioestabilizados;
- **Maturação:** é a segunda etapa da fermentação, porém, mais lenta, com duração de 30 a 60 dias, onde o composto orgânico passa para forma mineral, possibilitando que os nutrientes estejam mais disponíveis para serem utilizados como adubo.

Na fase inicial, a matéria orgânica, constituída basicamente de microrganismos mesofílicos, num meio ligeiramente ácido em temperatura ambiente, são capazes de atuar até a faixa de temperatura entre 25°C a 45°C. Esses microrganismos têm a capacidade de agir sobre os carboidratos simples e nitrogenados solúveis os quais são mais facilmente degradáveis, resultando em ácidos orgânicos simples, e segundo Siqueira (2006), reduzem o pH e aumentam a temperatura. Quando esta temperatura do composto se eleva até 40°C começam então, a predominar os microrganismos termofílicos, acarretando um aumento do pH, ou seja, tornando o meio mais alcalino. Ainda continuando o processo de elevação da temperatura, ao atingir 55°C, passam a atuar os microrganismos com propriedade de decompor as hemiceluloses, ceras e proteínas. Por fim, quando a

temperatura alcança em torno de 65°C são eliminados quase todos os microrganismos patogênicos do composto.

Como estas reações são exotérmicas, segundo Silva (1998) é recomendado o controle da temperatura, para que cada microrganismo atue gradualmente nos diferentes gradientes térmicos, no qual é submetida a matéria orgânica. Este procedimento de controlar a temperatura evita interromper a sequência da cadeia dos microrganismos, responsáveis pela estabilização do rejeito.

Segundo Kiehl (2002), a fase de maturação inicia quando estes microrganismos começam a esgotar-se, ou seja, a intensidade das reações químicas é reduzida, a temperatura do composto cai até atingir a do meio ambiente e o pH torna-se neutro. O resultado da maturação é um composto com aspecto de húmus, equivalendo de 40% a 60% do composto orgânico inicial. Este processo de biodigestão possui resíduos cuja destinação depende da eliminação dos riscos de contaminação do sistema em relação a agentes biológicos e químicos como metais pesados, nitrogênio, fósforo, micronutrientes, dentre outros.

Na deposição de resíduos como fertilizantes do solo, os microrganismos patogênicos ficam na superfície do solo e dos vegetais e seu tempo de sobrevivência varia de acordo com:

- sua própria capacidade de sobrevivência;
- a textura e pH do solo;
- a incidência de luz solar;
- a temperatura ambiente; e
- os métodos de aplicação no solo.

Caso seja feito o cultivo de hortaliças em solo que tenha sido adubado diretamente com este resíduo, existe a possibilidade de contaminação da produção vegetal. A contaminação da água também pode acontecer por arraste dos agentes patogênicos até os cursos d'água. As águas subterrâneas, especialmente na região onde o solo não possui grande porosidade, estão relativamente isentas de contaminações, desde que não haja ligação direta da água subterrânea com a superfície, como por exemplo, por poços sem filtros, que podem ser fonte de conexão entre a contaminação da superfície e a água subterrânea. As águas contaminadas, se usadas para consumo humano, animal ou irrigação de plantas comestíveis, são consideradas fonte de infecção (Soccol & Paulino, 2000).

Com relação à contaminação dos solos por metais pesados, Berton (2000) apresenta 2 filosofias: a de “zero impacto”, também denominada “balanço de metal”, e sugere que as quantidades de metais a serem adicionadas ao solo devem servir apenas para repor as pequenas perdas resultantes da remoção pelas culturas, erosão do solo e lixiviação. A outra é denominada “rota de exposição”, baseada em possíveis rotas de exposição pré-estabelecidas para os metais pesados após sua incorporação no solo agrícola. Determinou-se as concentrações mais baixas dos metais no solo que causam efeito adverso nos organismos mais sensíveis pertencentes em cada rota de exposição, resultando em limites mais amplos para acúmulo de metais pesados no solo.

A utilização de biossólidos pode trazer a presença de espécies químicas tóxicas, modificando a diversidade biológica do solo e alterando sua funcionalidade. Os metais, segundo Lambais & Souza (2000) podem causar toxicidade. O equilíbrio ecológico entre os microrganismos do solo é afetado. A resiliência dos sistemas e as consequências dessas alterações não são conhecidas e as consequências dessas alterações no solo tendem a ser levados em conta na legislação de proteção dos solos, água e ar.

Segundo Andreoli *et al.* (1997), as práticas de manejo da aplicação em solos devem levar em conta:

- as concentrações de nutrientes presentes no resíduo;
- os níveis cumulativos máximos permitidos no solo;
- quantidade de acumulação;
- condições regionais do solo;
- textura;
- matéria orgânica;
- intensidade do intemperismo;
- o pH;
- a CTC (Capacidade de Troca Catiônica) do solo, ou seja, a capacidade que tem um solo de reter ou liberar nutrientes para serem absorvidos e aproveitados pelas plantas), dentre outros fatores.

Portanto, é exigido que haja uma relação direta entre a composição do material a ser depositado no solo e na capacidade do solo de suportar este depósito, sem comprometimento de suas características.

A implantação do sistema de compostagem é importante para agregar novas receitas ao processo de reciclagem do lixo. Uma outra vantagem é de melhorar a

qualidade do RSU destinado como insumo, para geração de energia elétrica, em função de propiciar a redução do material orgânico e conseqüentemente ampliar o seu poder calorífico. Já a desvantagem do processo de compostagem são os efluentes que, embora mais diluídos, tem características similares ao chorume dos aterros sanitários.

2.2.4 Incineração

Segundo Henriques (2004), existem diversas tecnologias para a incineração de resíduos, refletindo o interesse crescente em superar as dificuldades, sendo que este estímulo tem sido adotado para a proposição de alternativas que viabilizem esta operação.

Dentre os processos de incineração, destacam-se:

- **a combustão de sais fundidos**, onde os resíduos são aquecidos a cerca de 900°C e destruídos ao serem misturados com carbonato de sódio (Na_2CO_3) fundido;
- **os incineradores de leito fluidizado**, onde o material sólido granulado como calcário, areia ou alumina, é suspenso no ar (fluidizado) por meio de um jato de ar e os resíduos são queimados no fluido a cerca de 900°C e a oxidação dos gases de combustão é completada em uma câmara de combustão secundária;
- **os incineradores de plasma**, que podem atingir temperaturas de até 10.000°C por meio da passagem de uma forte corrente elétrica através de um gás inerte, como argônio.

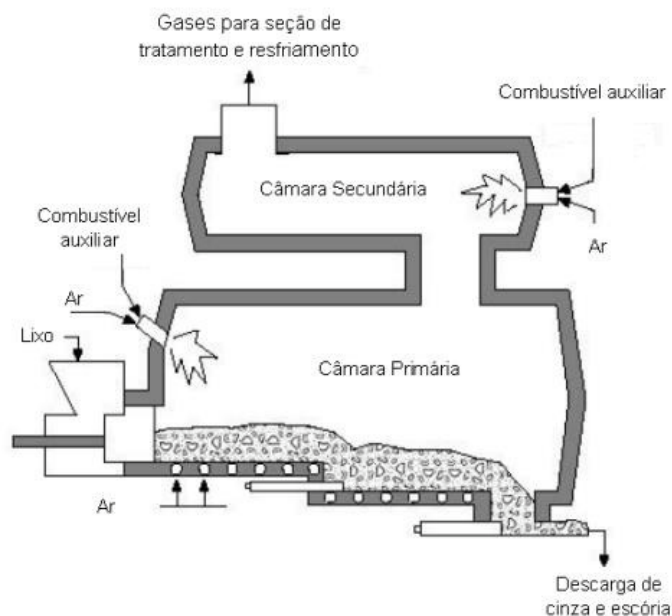
O plasma é constituído por uma mistura de elétrons e íons positivos, incluindo núcleos atômicos, e pode decompor compostos com sucesso, produzindo emissões muito menores do que os incineradores tradicionais.

O principal atrativo do processo de incineração de resíduos, é o potencial de redução de volume em até 90% e de recuperação de energia, entretanto, possui um alto custo de implantação e manutenção. Além de ser uma técnica cada vez mais debatida sob o aspecto ambiental, especialmente a cerca da produção de substâncias nocivas como as dioxinas e furanos (Poletto Filho, 2008).

Henriques (2004) descreve o processo de incineração como um método que emprega alta temperatura de fornos para queimar correntes de resíduos, que entram em combustão completa, garantindo o tratamento sanitário, a destruição de componentes orgânicos e minimizando a presença de resíduos combustíveis nas cinzas resultantes, podendo aceitar resíduos com pouco pré-processo ou tratamento.

A Figura 3 demonstra que o material entra na primeira câmara onde é injetado ar e, se necessário, um combustível auxiliar. Os gases sobem para a segunda câmara onde é injetado mais ar. Após esta etapa, os gases seguem para o sistema de tratamento enquanto os descartes (ou cinzas) ficam depositados na primeira câmara e são retirados a seguir.

Figura 3. Esquema dupla-câmara de combustão



Fonte: Aranda *et al.*, (2001)

Após a incineração, a parte sólida é retirada da grelha, sendo que a quantidade varia de 12% a 30% em massa (de 4% a 10% em volume) e tem o aspecto de cinza, sendo um material esterilizado e apto para ser aterrado ou mesmo aplicado à construção civil (tijolos, capeamento de estradas, etc.). Contudo, é frequentemente depositado em aterros sanitários, embora possa ser utilizado na construção de aterros, pois se trata de um material que não se degrada para formar gás de aterro, já que seus componentes orgânicos foram removidos no processo de incineração.

O resíduo, também denominado de cinzas, segundo Aranda *et al.*, (2001), é normalmente tratado para que haja a recuperação de materiais ferrosos. Os não ferrosos podem também ser recuperados no aproveitamento como insumo de algum interesse específico.

Uma pequena quantidade de finas partículas é carregada para fora da câmara de combustão pela exaustão dos gases (frequentemente como cinzas leves aquecidas); que é coletado no precipitador ou no filtro.

EPE (2008) afirma que o processo de geração de energia elétrica pela incineração dos RSU é “semelhante ao de usinas térmicas convencionais de ciclo Rankine e a

capacidade de geração depende diretamente da eficiência da transformação do calor em energia elétrica e do poder calorífico do material incinerado”.

A temperatura do vapor na caldeira deve ser, em geral, próxima a 200°C, de modo que o rendimento da geração de energia elétrica se limita, tipicamente, a valores ao redor de 20%.

Incinerador do tipo grelha são sistemas de incineração onde o RSU é inicialmente aquecido por meio de um combustível auxiliar, sem presença de ar, em uma grelha fixa ou em grelhas deslizantes, no qual tem-se a formação de resíduos sólidos ricos em carbono e cinzas. Operam na faixa de combustão entre 450°C e 1.300°C gerando também produtos líquidos como: água, alcatrão e óleos. Nesse caso, é necessário que o RSU tenha um PCI maior que 2 MJ/kg.

Incinerador do tipo leito fluidizado são sistemas onde o RSU é inicialmente triturado e posteriormente fluidizado na combustão, com temperatura ótima de operação entre 450°C e 900°C. Contudo, para que seja mantida uma temperatura de combustão à 850°C, é necessário que o RSU tenha um PCI maior que 2 MJ/kg.

Nas modernas instalações, o ar é pré-aquecido entre 420°C e 650°C, melhorando a eficiência do sistema. Desta forma a agitação do leito pelo ar de fluidização permite a combustão completa. É possível melhorar a combustão por meio de recirculação no seio do leito (leito fluidizado rotativo) pela inserção de placas defletoras que asseguram maior eficiência de transferência de calor (Silva, 1998).

- As vantagens desta tecnologia são, principalmente:
- facilidade na concepção e na manutenção;
- eficácia da combustão;
- redução de tamanho do sistema;
- pouca emissão de NOX, pelo fato de operar com gás a baixa temperatura e mínimo excesso de ar;
- temperatura do leito é relativamente uniforme.

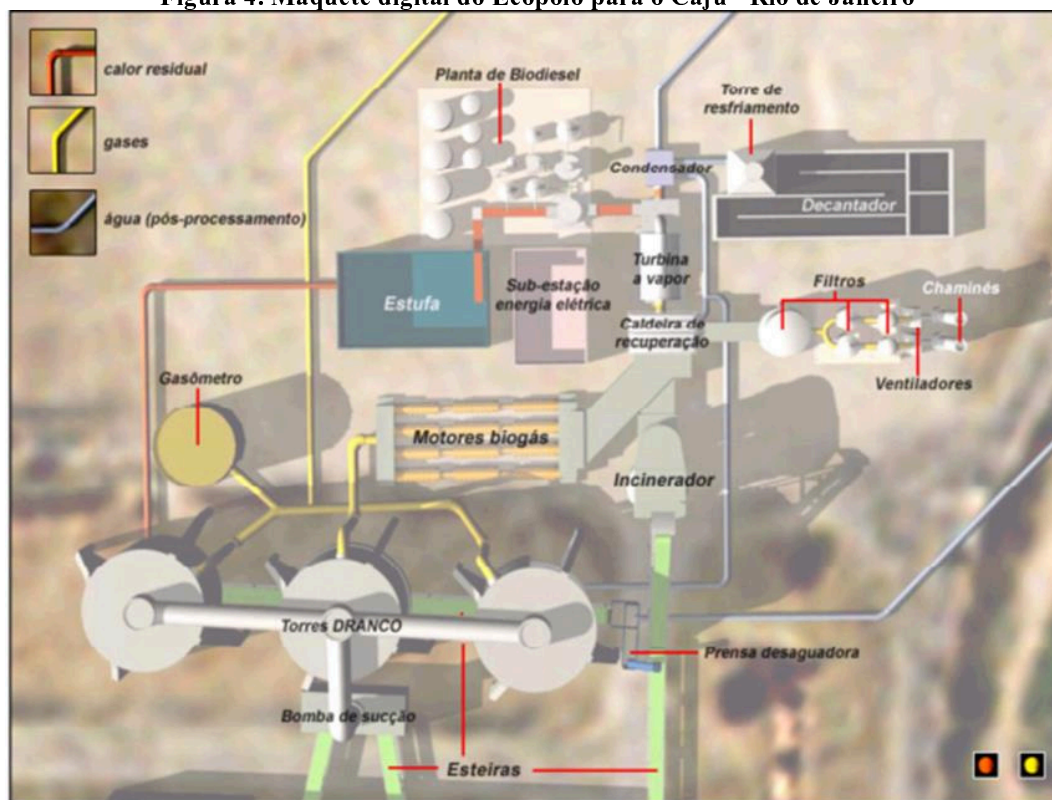
As desvantagens estão relacionadas com a impossibilidade de tratar todos os tipos de resíduos, em particular certos tipos de compostos orgânicos que causam a formação de aglomerados.

A conversão de grelha para leito fluidizado borbulhante é realizada por caldeiras BFB e apresentam uma eficiência superior às caldeiras com grelha para a mesma energia gerada, proporcionando menores custos de transporte, manuseio de cinzas e dimensões

de equipamentos auxiliares. Ademais, a construção da fornalha de uma caldeira BFB não utiliza partes móveis, reduzindo os custos de manutenção, o custo total da manutenção de uma caldeira BFB representa o custo associado apenas à manutenção da grelha de uma caldeira que utiliza esta tecnologia. Mesmo a tecnologia BFB apresentando maiores benefícios, normalmente, após análises internas, o cliente compara os custos de investimento para ambas as soluções e conclui que a tecnologia BFB é muito cara, pede para otimizar o processo, mas prefere manter a tecnologia com grelha.

Há um pedido de patente brasileira de processo onde o gás natural é substituído pelo gás de aterro ou de biodigestor, de modo que toda a energia de entrada na usina é proveniente do resíduo. A esse processo denominou-se de Ecopolo, estima-se que o rendimento do processo supere 36% e o consumo específico se situe entre 1,9 e 2,6 ton/MWh com a utilização de RSU com poder calorífico de 1.850 kcal/kg. O processo está representado pela Figura 4.

Figura 4. Maquete digital do Ecopolo para o Caju - Rio de Janeiro



Fonte: IVIG, 2005.

Entretanto, tecnologia demanda disponibilidade de gás natural, um obstáculo na região de estudo.

EPE (2008) analisa que a redução do volume de resíduos depositados em aterro sanitário é uma das principais vantagens da incineração. Esta redução varia de 85% a 90% do volume original e não impede a recuperação dos metais recicláveis.

Além disso, as cinzas produzidas na incineração podem servir como matéria prima para a produção de cimento do tipo Portland. Contudo, embora produza mais energia elétrica o GDL, digestão anaeróbica e a compostagem é preciso ressaltar que a incineração é um processo emissor de dioxinas que exige cuidados especiais no tratamento dos gases de exaustão; e as cinzas produzidas na incineração também contém diversos poluentes. Além disso, de acordo com (Rand *et al.*, 2000), as usinas de incineração apresentam elevados custos de investimento, operação e manutenção.

Assim, mesmo que o projeto de uma usina WTE (waste-to-energy) possa atender aos padrões pré-estabelecidos de emissão de poluentes, a decisão por sua implantação deve levar em conta explicitamente esses aspectos.

Por outro lado, as maiores desvantagens são devidas à utilização de resíduos clorados, cujo poder calorífico é baixo e a umidade é excessiva, o que acaba por prejudicar a combustão implicando na utilização de sistemas auxiliares para manter a combustão. Além disso, a combustão de RSU abre a possibilidade para a concentração de metais tóxicos nas cinzas e emissão de dioxinas e furanos.

Os processos de incineração, para o atual cenário, não são indicados como rota tecnológica adequado para esse estudo, em razão dos custos envolvidos (implantação, operação e controle de emissões) independentemente se por leito fluidizado circulante ou borbulhante, ou até mesmo em sistemas de grelhas, pois, dadas as características do RSU, esses processos necessitam de um pré-tratamento que impacta sua viabilidade econômica, além das dificuldades na fluidização do RSU por possuir diferentes densidades.

2.2.5 Pirólise

A pirólise é a decomposição ou mesmo a alteração da composição de materiais quando submetido a altas temperaturas sem a presença de oxigênio, produzindo um resíduo na forma de carvão, podendo chegar a até 90% de redução do volume inicial.

No caso do RSU, o processo de pirólise reduz o volume do resíduo orgânico e pode transformar em energia utilizável que, dependendo das características do processo e do RSU, poderá produzir óleos e gases combustíveis, carvão e alcatrão. A pirólise tem sido focada como um processo para redução dos impactos ambientais advindos da deposição do RSU.

Ojolo *et al.*, (2004) a conceitua como degradação dos resíduos sólidos com aquecimento em atmosfera deficiente de oxigênio, abaixo do nível estequiométrico de combustão. Ainda, segundo o autor, os processos pirolíticos são endotérmicos, ao contrário do processo de incineração, sendo assim necessário fornecer calor ao sistema.

Ocorrem em temperaturas na faixa de 150°C até 1600°C segundo Andrietta (2002), por meio de conversão catalítica ou não, dependendo do tipo de resíduo a ser tratado e do tipo de equipamento utilizado. Os resíduos quando submetidos a processos pirolíticos são convertidos em três grupos de subprodutos, conforme preconiza Menezes *et al.*, (2000):

- gases constituídos, principalmente, de hidrogênio, metano e monóxido de carbono;
- combustível líquido, composto principalmente por hidrocarbonetos, álcoois e ácidos orgânicos;
- resíduos constituídos por carbono quase puro (char) e vidro, metais e outros materiais inertes (escórias).

Quando o processo de tratamento é aplicado a resíduos plásticos, a pirólise dos polímeros orgânicos se inicia em torno de 150°C-200°C, e acelera com o aumento da temperatura. Pode ocorrer através de reações de despolimerização e de cisão aleatória das cadeias, gerando subprodutos de alto valor energético Menezes *et al.*, (2000).

A pirólise se processa no reator rotativo disposto em posição horizontal, revestido internamente com material refratário. O processo é iniciado com a injeção de óleo combustível ou de gás no interior da câmara, em sentido contrário ao alinhamento dos resíduos, ou seja, em contra fluxo. Após a reação, os resíduos sólidos e escória são resfriados e segregados.

O carbono quase puro (char), os metais e os vidros são separados por flotação, magnetismo e ciclonação, respectivamente. Os gases neste processo são desviados até um purificador onde se misturam com ar atmosférico e são novamente queimados, evitando, desta forma, o lançamento na atmosfera de substâncias prejudiciais ao meio ambiente. Os gases quentes saem do purificador e passam através de uma caldeira aquatubular, onde o calor trocado produz vapor que pode ser usado para calefação ou resfriamento de ambientes, ou ainda, para mover turbinas geradoras de potências.

Após a passagem pelas caldeiras, os gases são resfriados e lavados em torres tipo scrubbers, onde os particulados e cinzas são removidos. Antes do lançamento na atmosfera os gases sofrem ainda desumidificação, o que evita a formação de densas

plumas que podem ser prejudiciais ao ambiente, pois contribuem na formação de “*smog*”. Toda água utilizada no processo é tratada no clarificador e recirculada. O excedente destina-se à limpeza das instalações e dos ambientes internos (Aisse, 1981).

Diversos são os processos pirolíticos como geração de combustíveis para caldeiras de leito fluidizado na geração de energia ou mesmo, na recuperação de gases diretamente para turbinas e máquinas térmicas. Bueno (2011) ressalta a pirólise como importante solução para equacionar problemas com deposição de RSU: “a pirólise, como qualquer tecnologia de decomposição térmica libera gases, material particulado e resíduos sólidos que, se não forem manejados adequadamente, podem causar poluição. As altas temperaturas, especialmente quando se fala em pirólise de resíduos sólidos urbanos, levam à:

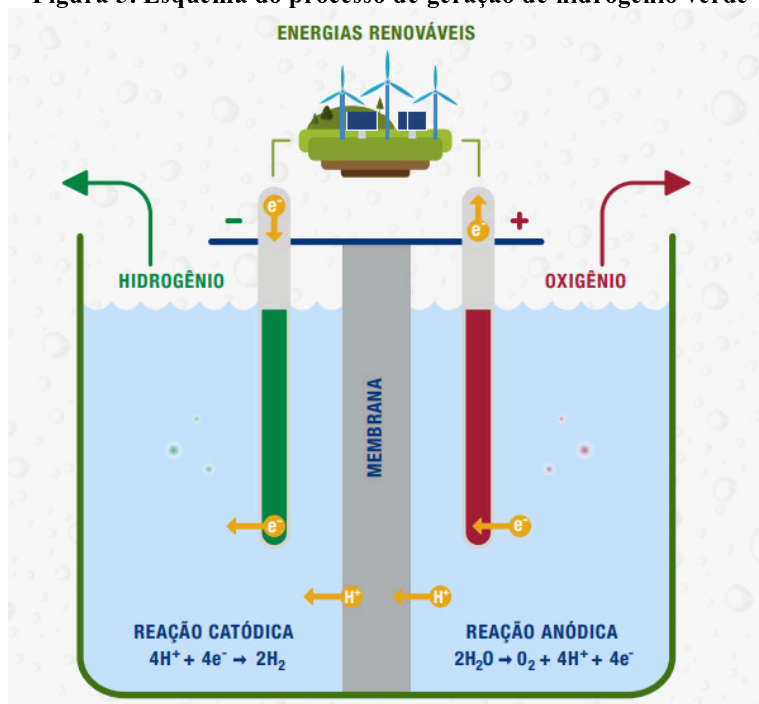
- formação de óxidos nitrosos e de ácido clorídrico;
- a vaporização de metais tóxicos, como cádmio e mercúrio.

Em contrapartida, oferece uma alternativa para a reciclagem do RSU e diminui a emissão de metano dos resíduos não aproveitados. O processo pirolítico deve enfrentar grandes desafios, porém, em se equacionando as dificuldades relacionadas ao aumento da escala das plantas, poderá representar um meio eficaz de manejar o RSU.

2.2.6 Hidrogênio verde

A geração de hidrogênio é realizada através de um processo químico, a eletrólise, que se baseia na aplicação de corrente elétrica para separar o hidrogênio do oxigênio presente na água. A água usada na eletrólise deve conter sais minerais para conduzir eletricidade. Dois eletrodos são submersos na água e conectados a uma fonte de energia, aplicando uma corrente contínua. Durante a eletrólise, ocorre a dissociação do hidrogênio e oxigênio quando os eletrodos atraem íons de carga oposta, desencadeando uma reação de oxirredução sob o efeito da eletricidade. A Figura 5 esquematiza o processo.

Figura 5. Esquema do processo de geração de hidrogênio verde

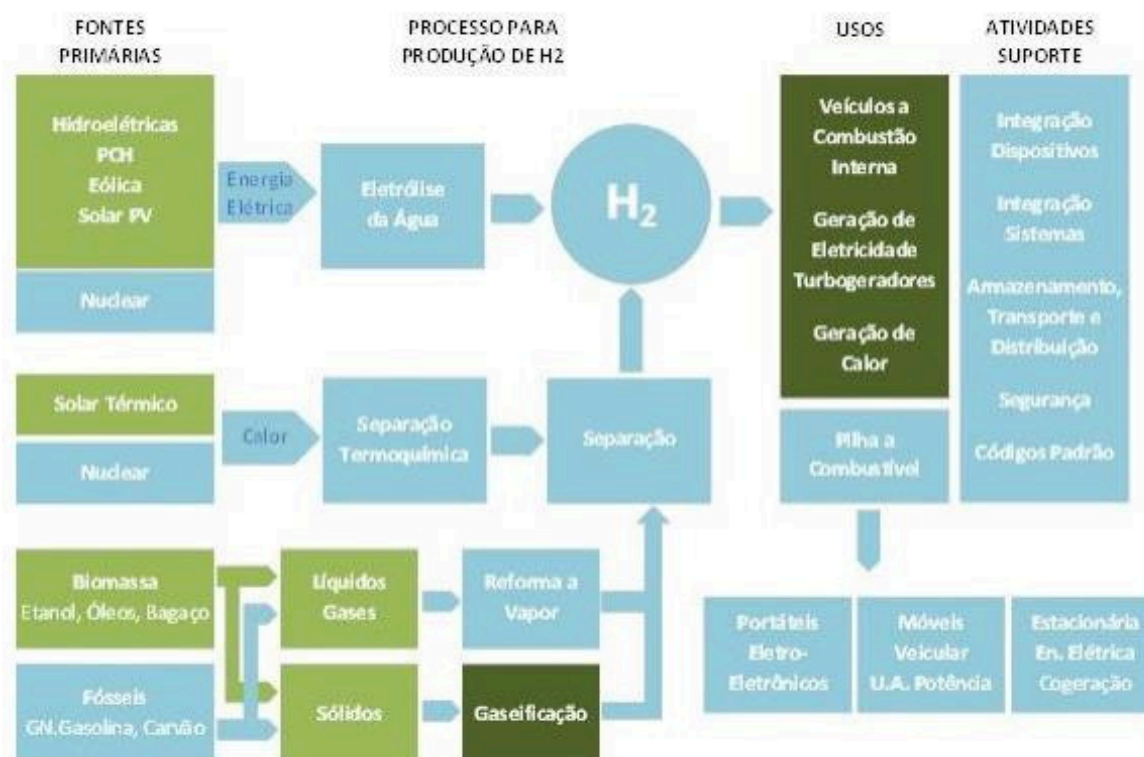


Fonte: IBERDROLA (2023)

A empresa H2-Industries Inc, com sede em Nova York (EUA), tem como objetivo reduzir o acúmulo de resíduos e gerar energia na forma de hidrogênio verde. A empresa planeja converter resíduos orgânicos e de aterros sanitários em hidrogênio verde e dióxido de carbono puro (CO₂), sem a necessidade de eletricidade externa ou queima de resíduos. O plano inclui uma área de 200 mil metros quadrados, com capacidade inicial para converter até 1 milhão de toneladas de resíduos sólidos urbanos por ano, com a possibilidade de expansão para 4 milhões de toneladas.

A obtenção do hidrogênio pode se dar a partir de diversas matérias-primas. A Figura 6 apresenta os processos possíveis, de forma simplificada, desde sua produção até aplicações.

Figura 6. Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio



Fonte: EPE (2021).

Vantagens e desvantagens da utilização do hidrogênio verde são listadas a seguir.

▪ **Vantagens:**

- O hidrogênio verde não emite gases poluentes, nem durante a combustão, nem durante o processo de produção.
- É facilmente armazenável, permitindo seu uso em momentos e para fins diferentes da produção.
- O hidrogênio verde pode ser transformado em eletricidade ou combustíveis sintéticos e utilizado para fins comerciais, industriais ou de mobilidade.

▪ **Desvantagens:**

- A geração de energia a partir de fontes renováveis é mais cara;
- A produção de hidrogênio requer mais energia do que outros combustíveis;
- O hidrogênio é altamente volátil e inflamável, exigindo rigorosos requisitos de segurança para prevenir vazamentos e explosões.

2.2.7 GCDR – Gás combustível derivado de resíduos

A Energia Limpa do Brasil (ELB) apresenta uma tecnologia do processo de produção de GCDR (Gás Combustível Derivado de Resíduos) em regime contínuo a partir de RSU para Geração de Energia Elétrica.

O conjunto de equipamentos é composto de todos os itens necessários para o perfeito funcionamento da planta, desde o recebimento do RSU até a combustão do GCDR. Tem como benefícios adicionais a redução do volume do RSU em aterros e consequente redução da produção de chorume.

O GCDR produzido substitui combustíveis fósseis e/ou biomassa na produção de energia termelétrica, contribuindo para suprir a demanda energética, bem como, para solucionar o problema da destinação do RSU, um dos passivos ambientais mais problemáticos da atualidade.

O processo não necessita de reciclagem prévia e numa abordagem simplificada, pode-se afirmar que o processo se dá em 3 estágios:

- Primeiro Estágio - Geração do GCDR: Neste estágio, o RSU é inserido controlada e continuamente em uma câmara onde ocorre a oxidação parcial a baixas temperaturas para gerar calor, suficiente apenas para promover a aceleração do processo de degradação do RSU que se encontra na câmara, gerando o GCDR. Esta câmara possui um leito móvel que faz o material avançar em direção à extração das cinzas à medida que sofre o tratamento térmico. Os materiais inorgânicos, em especial as cinzas, são retirados automática e continuamente neste estágio.
- Segundo Estágio - Reforma do GCDR: Neste estágio, o GCDR gerado é submetido a uma reforma química por reação catalítica de Fischer-Tropisch que faz com que o monóxido de carbono reaja com a água para formar produtos com maior poder calorífico, disponibilizando o oxigênio para a reação de gaseificação. Com a vantagem de que este oxigênio acaba substituindo o ar atmosférico e, conseqüentemente, diminuindo o teor de nitrogênio e aumentando o poder calorífico do gás gerado, que posteriormente irá alimentar a câmara de combustão.
- Terceiro estágio - Oxidação do GCDR: Nesta etapa, o GCDR gerado e reformado, é totalmente oxidado a alta temperatura, ou seja, literalmente queimado, para, então, ser direcionado à caldeira e depois descartado na atmosfera. O resultado desta reação atende às normas do CONAMA.

A câmara, utilizada para Terceiro Estágio, é do tipo torcional, com tecnologia alemã, largamente aplicada em plantas que utilizam gás pobre, de processo, como o gás residual dos autos fornos da indústria siderúrgica (GAF). Todo e qualquer GCDR produzido passa obrigatoriamente pela câmara de combustão torcional para garantir a sua oxidação completa a altas temperaturas. Logo, o GCDR produzido não é armazenado, mas sim, reformado e oxidado imediatamente na câmara torcional acoplada no equipamento que o gerou.

A utilização dos gases oxidados, neste processo, se dá exatamente da mesma forma como já é feito, normalmente, com outros combustíveis gasosos tais como o Gás Natural, Biogás, GLP, Gás de Alto Forno ou até combustíveis líquidos, como o óleo BPF. É possível atender, por exemplo, total ou parcialmente, plantas de grande porte para geração de vapor superaquecido e energia elétrica, bem como, pequenas plantas de vapor saturado para processos fabris, geração de gases quentes para secadores e outros. A planta conta com um gerador de vapor superaquecido de alta pressão, construído e controlado conforme normas em vigor.

Os gases superaquecidos, totalmente oxidados, são aspirados para o gerador de vapor, de onde irão acionar uma turbina a vapor para a geração de energia elétrica. A perspectiva de recuperação e reaproveitamento energético ocorre por meio de calor, eletricidade ou combustíveis alternativos como o CDR (Combustível Derivado de Resíduos) em cimenteiras, geração de biogás dos resíduos orgânicos em biodigestores.

2.3 TECNOLOGIAS UTILIZADAS NO BRASIL

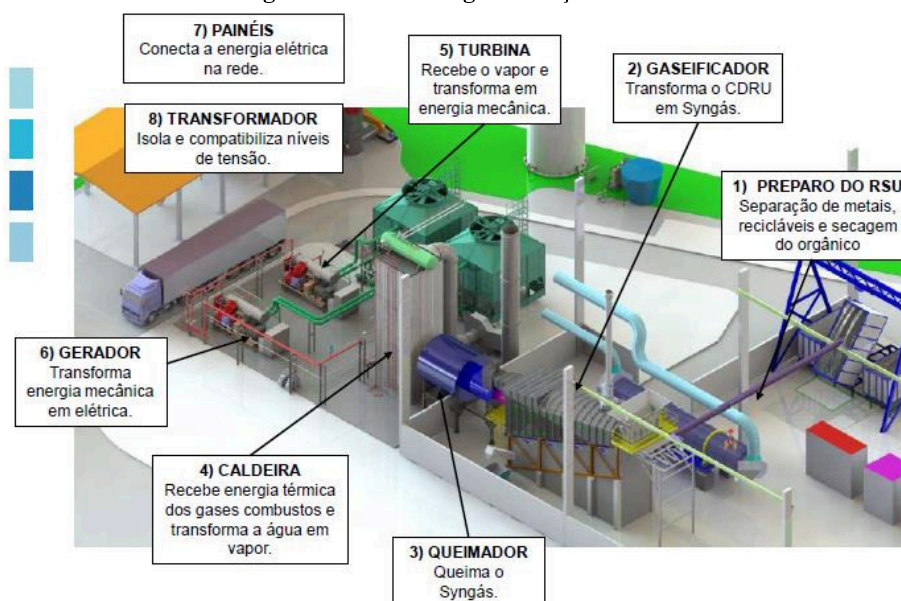
Os métodos mais empregados para a recuperação energética a partir de RSU utilizam a incineração por processo de combustão. O resíduo que será utilizado tem influência sobre a eficiência do sistema de recuperação energética, podendo variar de acordo com a localidade, de como são gerados, principalmente da composição, poder calorífico e umidade. Contudo, o compromisso dos técnicos que apresentam este estudo, assumido publicamente é de não utilizar a incineração como opção tecnológica neste estudo, ainda que seja apresentada como uma das tecnologias adotadas para recuperação energética de RSU.

Abaixo estão descritas as experiências brasileiras que adotaram diferentes tecnologias para a geração de energia a partir de RSU.

2.3.1 Mafra – SC

Em Mafra (SC), a empresa CCS, parceira do empreendimento pioneiro Eletroglyx – Usina Termoelétrica, iniciou em 2022 a fase de montagem de uma usina para geração de 2,7 MW/h de energia elétrica gerada a partir da queima de RSU e biomassa. No projeto, será utilizada a classe de caldeiras CR ALFA, que permite o melhor aproveitamento dos gases provenientes da gaseificação de RSU (CCS Industrial, 2022). A Figura 7 ilustra a planta de gaseificação do empreendimento.

Figura 7. Planta de gaseificação de Mafra – SC



Fonte: ABREN (2020).

2.3.2 Boa Esperança – MG

No município de Boa Esperança, situado no sul de Minas Gerais, está em andamento o projeto de uma usina térmica, utilizando o processo de gaseificação. Esse projeto visa a geração de energia a partir do tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU). A unidade terá a capacidade de produzir 1 MW de eletricidade por mês, o que representa até 25% da demanda energética do município. A responsabilidade pela implementação dessa usina recai sobre a Furnas Centrais Elétricas S.A.

Para concretizar esse empreendimento, foi estabelecido o Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (Projeto P&D), com recursos provenientes do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) (De Oliveira, 2019). Em termos simplificados, o Projeto P&D tem como objetivo receber os RSU provenientes do município de Boa Esperança, submetê-los a uma triagem para separar materiais recicláveis e inadequados. Posteriormente, esses resíduos passarão por etapas

de trituração, secagem e homogeneização, garantindo granulometria, umidade e poder calorífico conforme as especificações necessárias. Esse processo resultará na produção do Combustível Derivado de Resíduos (CDR).

O CDR, por sua vez, será submetido a processamento em um Reator Termoquímico com leito fluidizado, sob uma atmosfera de baixa concentração de gás oxigênio e alta temperatura. Esse procedimento promove a quebra de moléculas (gaseificação) e produz o gás de síntese (syngas), uma mistura gasosa composta por hidrogênio, monóxido de carbono e metano. O gás de síntese será direcionado para uma caldeira que o queimará, aproveitando o calor gerado para produzir vapor d'água pressurizado e, subsequentemente, gerar energia elétrica por meio de turbinas a vapor.

A capacidade de geração de energia térmica dessa usina alcança 2.880.000 kWh por mês, sendo exclusivamente destinada à produção de energia elétrica. O percentual de conversão de energia térmica em energia elétrica é de 26,4%, totalizando 761.000 kWh por mês. Destes, 20% serão destinados a suprir as necessidades energéticas da própria planta, enquanto os restantes 80% estarão disponíveis para exportação.

Além disso, a unidade tem uma capacidade de processamento que permite lidar com até 60 toneladas de RSU por dia, tornando-se uma solução ambientalmente sustentável e economicamente viável para a geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos.

As Figuras abaixo apresentam imagens do projeto e fotos aéreas da usina termoquímica.

Figura 8. Layout da Usina Termoquímica de Boa Esperança – MG



Fonte: Ferreira (2021).

Figura 9. Vista aérea da Usina Termoquímica de Boa Esperança – MG



Fonte: Ferreira (2021).

Figura 10. Vista aérea da Usina Termoquímica ao lado do lixão do município de Boa Esperança – MG



Fonte: Ferreira (2021).

2.3.3 Belo Horizonte – MG

O município de Belo Horizonte conta com uma Central de Tratamento de Resíduos Sólidos (CTRS) localizada na BR-040, km 513, bairro Jardim Filadélfia, na região Noroeste. Funcionam no local uma Central de Aproveitamento Energético do

Biogás, uma Estação de Reciclagem de Entulho, a Unidade de Compostagem, a Unidade de Recebimento de Pneus e uma Unidade de Recebimento de Pequenos Volumes. (Prefeitura de Belo Horizonte, 2019).

A usina, pioneira em Minas Gerais, inaugurada em julho de 2011 e a quarta instalada no Brasil, processa e queima o gás metano gerado a partir da decomposição do lixo depositado no antigo aterro sanitário da Superintendência de Limpeza Urbana (SLU₂). A energia gerada é comercializada para CEMIG e distribuída em sua rede.

De acordo com a prefeitura municipal de Belo Horizonte (2019), a Central de Aproveitamento Energético do Biogás, concessão do Consórcio Horizonte S.A., já permite captar e fazer a combustão do biogás existente em 25 milhões de toneladas de resíduos que foram depositados no aterro ao longo de 20 anos, evitando assim os problemas da emissão descontrolada na atmosfera, como odores, perigos de incêndio e aumento do efeito estufa.

Com a central, a redução das emissões responsáveis pelo efeito estufa, é de cerca de 4 milhões de toneladas equivalentes de gás carbônico em 15 anos. O biogás gerará o valor médio de 4,278 MW de potência, o suficiente para abastecer 20 mil casas de consumo inferior a 100 KWh/mês.

2.3.4 Seropédica – RJ

A Empresa Ciclus trata aproximadamente 10.000 ton/dia de RSU na CTR criada para substituir o aterro controlado de Gramacho, e pretende construir uma usina WTE *mass burning* de 30 MW de potência instalada, para tratar 1.300 ton/dia de RSU (ABREN, 2020). A CTR está localizada na cidade de Seropédica – RJ. Os resíduos são provenientes do Rio de Janeiro, através de concessão da Comlurb e dos municípios Seropédica, Itaguaí, Mangaratiba, São João de Meriti, Piraí e Miguel Pereira (Ciclus Ambiental, 2023).

2.3.5 Campo Grande – MS

Em 2019, a Prefeitura de Campo Grande, em parceria com a Semagro (Secretaria de Meio Ambiente, Desenvolvimento Econômico, Produção e Agricultura Familiar), e da Agraer (Agência de Desenvolvimento Agrário e Extensão Rural), inauguraram a primeira usina do Brasil a fazer todas as operações necessárias com resíduos. Desde a coleta seletiva, transporte e tratamento, que inclui a conversão dos resíduos em adubo orgânico e aproveitamento energético por combustão (SEMADESC, 2019). A usina funciona com

resíduos gerados pela Central de Abastecimento de Mato Grosso do Sul (Ceasa/MS) e tem capacidade de tratar 100 toneladas de resíduo por mês (IMASUL, 2019).

2.3.6 São José dos Pinhais – PR

A CS Bioenergia, formada pela estatal Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e pelo grupo Cattalini Bio Energia, possui uma usina de biogás localizada no município de São José dos Pinhais – PR, e tem capacidade de produzir 2,8 MW. A usina utiliza como substrato resíduos orgânicos e lodo, resíduos de frutas e verduras, resíduos de indústria alimentícia, lodo secundário (lodos ativados), lodo primário e gorduras. Através do biogás é possível gerar energia elétrica e térmica (CsBio Energia, 2023).

A grande maioria dos resíduos orgânicos enviados é proveniente da maior estação de tratamento de esgoto de Curitiba – PR na forma de lodo sanitário. A usina, apresentada na Figura 11 possui capacidade instalada de 900 m³/dia de lodo de estação de tratamento de esgoto e 150 toneladas/dia de outros substratos (frutas e verduras, resíduo indústria alimentícia e gordura), no qual os substratos provenientes de geradores comerciais e industriais na forma de resíduos orgânicos sólidos ou líquidos com potencial de geração de biogás (Fórum Sul Brasileiro de Biogás e Biometano, 2023).

Figura 11. Usina de biogás CSBio Energia



Fonte: CsBio Energia (2023).

2.3.7 Nova Iguaçu - RJ

O sistema de produção de energia elétrica a partir do biogás produzido pela decomposição do lixo na Central de Tratamento de Resíduos (CTR) de Adrianópolis, em Nova Iguaçu entrou em operação no ano de 2019. A usina tem capacidade total de gerar

em torno de 16,5 MW, com potencial para abastecer aproximadamente 65 mil residências de padrão médio de consumo de energia. A CTR é administrada por uma empresa por meio de uma concessão da Prefeitura de Nova Iguaçu.

A unidade de geração de energia é composta por 12 motores movidos a biogás de aterro sanitário. A energia produzida na CTR é comercializada no mercado para consumidores livres e em leilões de energia elétrica. Além dos resíduos de Nova Iguaçu, a Central de Tratamento recebe também resíduos de outras cidades da Baixada Fluminense, como Belford Roxo, Nilópolis, Queimados e São João de Meriti, e de grandes empresas. O local tem capacidade para receber 5 mil toneladas diárias de resíduos (Prefeitura de Nova Iguaçu, 2019).

2.3.8 Minas do Leão – RS

O município de Minas do Leão está localizado a 80 km de Porto Alegre e possui uma Unidade de Valorização Sustentável (UVS). Em janeiro de 2007 foi aprovado o projeto de captura e queima de biogás gerado no aterro. Atualmente em operação, sua estrutura é composta por um moderno sistema de coleta e oxidação térmica do biogás, sopradores, tanque de separação de condensado e queima controlada em *flare* enclausurado, o que possibilita uma redução anual em torno de 170 mil toneladas de CO₂.

A CRVR inaugurou no ano de 2015 uma unidade de geração de energia, tendo como combustível o aproveitamento do biogás obtido da decomposição dos rejeitos depositados. A unidade geradora tem uma potência de 8,5 MWh, podendo atender uma população de aproximadamente 100 mil habitantes e está ilustrada na Figura 12 (CRVR, 2023).

Figura 12. Usina Biotérmica Minas do Leão



Fonte: CRVR (2023).

2.3.9 Canhanduba – SC

A usina termelétrica Itajaí Biogás e Energia S.A. é operada desde 2014 e produz 1 MW de energia elétrica, suficiente para abastecer cerca de 3.500 residências. A energia é enviada para as Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC). A usina explora biogás do aterro sanitário de Canhanduba, que funciona desde 2006, dispondo cerca de 300 t/dia de RSU (Nascimento *et al.*, 2019).

2.3.10 Brasília – DF

No Despacho n.º 1.512, de 21 de junho de 2022, a ANEEL considerou o disposto na Portaria n.º 4.742, de 26 de setembro de 2017, na Resolução Normativa n.º 876, de 10 de março de 2020, e o Processo n.º 48500.004198/2022-18, confirme segue: (i) registra o Requerimento de Outorga - DRO da Central Geradora Termoelétrica – UTE RSU Brasília visando à Autoprodução de Energia Elétrica - AP, município de Brasília, no Distrito Federal, em favor da empresa RSU Investimentos e Participações Ltda., inscrita no CNPJ sob o n.º 22.395667/0001-73, conferindo-lhe as prerrogativas estabelecidas no § 1º do art. 6º da Resolução Normativa n.º 876, de 2020, observadas as condições dispostas no art. 7º dessa Resolução; e (ii) informa que a opção por emissão de outorga pela ANEEL depende de apresentação dos documentos constantes dos Anexos I e II da Resolução Normativa n.º 876, de 2020. Destaca-se que a Resolução Normativa n.º 876, de 2020, acima citada, encontra-se revogada.

O empreendimento de 16.000 kV utiliza biomassa a partir de resíduos sólidos urbanos como combustível.

2.3.11 Uberlândia – MG

Segundo FEAM (2014), Uberlândia conta com uma usina termoelétrica no aterro sanitário do município. A usina entrou em operação no ano de 2012, sob responsabilidade da Energás Geração de Energia, a usina utiliza dois motores geradores que produzem ambos 2,8 MW de energia elétrica, sendo esta energia injetada na rede da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). O local tem capacidade de dispor 600 t/dia de RSU (FEAM, 2009).

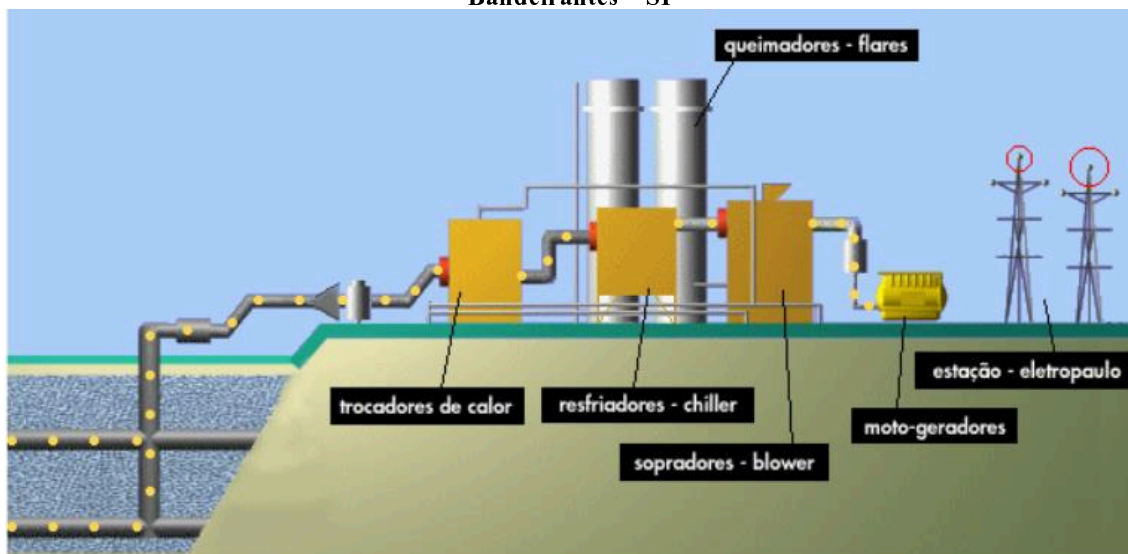
2.3.12 Bandeirantes – SP

Segundo Quezado (2010), o aterro Bandeirantes, localizado na região metropolitana de São Paulo é um projeto adequado ao Mecanismo de Desenvolvimento

Limpo (MDL), implantado em aterro sanitário com uma boa eficiência de aproveitamento energético.

Em 2004 foi iniciado o sistema de captação do biogás gerado no aterro após uma série de estudos sobre a viabilidade do projeto e a implantação de uma unidade, onde o gás captado no aterro é tratado (retirada a umidade e feita uma pré-filtragem) e depois transformado em energia, conforme esquematizado na Figura 13.

Figura 13. Esquema de funcionamento do projeto de aproveitamento energético no aterro Bandeirantes – SP



FONTE: Souza *et al.*, (2011)

A infraestrutura do Aterro Sanitário Bandeirantes permite a drenagem e coleta do gás gerado na decomposição dos resíduos, o biogás é posteriormente conduzido para beneficiamento energético na Usina Termelétrica Bandeirantes (UTE Bandeirantes). A capacidade de geração de energia do local é de 20 MWh, sua produção anual de energia é de 170.000 MWh, o suficiente para abastecer uma cidade de 400 mil habitantes (CarbonFair, 2023).

2.3.13 Barueri – SP

Esta será a primeira usina waste to energy da América Latina com recuperação energética, por meio do tratamento de resíduos sólidos gerando energia elétrica.

Iniciada a construção em 2020 na cidade de Barueri, no estado de São Paulo, a Unidade de Recuperação Energética que entrará em operação em 2025, com a contratação da energia elétrica realizada no Primeiro Leilão da ANEEL, produzida a partir dos resíduos sólidos urbanos, no caso o Leilão de Energia Nova A-5 de 2021.

O empreendimento processará cerca de 300 mil toneladas de resíduos sólidos por ano, valorizando os resíduos de, aproximadamente, 850 mil habitantes, transformando em energia limpa suficiente para suprir a demanda de cerca de 320 mil pessoas (URE Barueri, 2023).

A empresa Foxx Haztch atua no segmento de geração de energia a partir de RSU baseado no modelo WTE mass burning, ao projetar a usina de Barueri, com 20 MW de potência instalada e potencial de tratar até 825 ton/dia de RSU, com tecnologia chinesa da empresa Jin Jang.

2.3.14 Mauá – SP

A URE Mauá é uma unidade de recuperação de energia que será implantada pela Lara Central de Tratamento de Resíduos Ltda. em uma área licenciada pela CETESB para operação de aterro sanitário. Essa unidade queimará resíduos urbanos coletados para gerar energia elétrica por meio de turbinas a vapor, sendo projetada para atender a quantidade de resíduos recebido pelo Aterro Sanitário Lara, incluindo o uso do biogás gerado no aterro como combustível (CPEA, 2020). Será um projeto com a tecnologia alemã Standard-kessel Baumgarte (ABREN, 2020).

De acordo com CPEA (2020), a URE Mauá funcionará 24 horas por dia durante aproximadamente 340 dias por ano, em três turnos de 8 horas cada, com uma capacidade total de geração de energia de 77 MW. O projeto inclui várias estruturas, como recebimento e armazenamento de resíduos, pátio para caminhões compactadores, tratamento mecânico e biológico de resíduos, fornos, caldeiras, sistema de tubulações, casa de turbina, torre de resfriamento, tratamento de gases, chaminé e subestação, além de instalações de apoio como portaria de controle, balanças, área de manutenção e escritório administrativo.

Os resíduos serão recebidos na URE Mauá, passando por um processo de tratamento mecânico e biológico, incluindo separação, compostagem e secagem. Em seguida, serão queimados para produzir vapor e eletricidade em turbinas, com aproveitamento do biogás gerado no aterro. Os gases gerados durante esses processos serão tratados e purificados antes de serem liberados no ambiente.

2.3.15 Ponta Grossa - PR

A rota tecnológica dessa experiência é a de biodigestores, onde é produzido biogás que alimenta motores, que por sua vez produzem energia elétrica, sendo esta

disponibilizada na rede da Copel, distribuidora de energia do estado do Paraná. O projeto prevê o seguinte fluxo: o recebimento dos resíduos é realizado em um galpão onde encontra-se uma linha de triagem automatizada para coleta de resíduos e impurezas que não podem ser enviadas para os biodigestores, a estrutura da usina de biogás é apresentada na Figura 14.

Figura 14. Estrutura da usina de biogás



Fonte: PGA Ambiental, 2023

Os resíduos seguem para um pré-tanque onde permanecem armazenados, são coletadas amostras para análise laboratorial e posterior validação para serem conduzidos aos biodigestores.

Dois biodigestores dimensionados para atender a demanda são equipados com aquecedores e dispõem de agitação, o que promove a geração do biogás, rico em metano.

O subproduto é um líquido denominado digestato, sendo este encaminhado para uma lagoa sendo o possível uso a fertilização por meio de irrigação. (PGA Ambiental, 2023).

2.4 POLÍTICAS PÚBLICAS

O governo federal estabeleceu o Programa Lixão Zero conforme Portaria n°. 307, de 30/04/2019, que possui dentre os seus objetivos apresentados no Plano de Ação o de “potencializar a geração de energia a partir de resíduos sólidos, na busca por adequar o ambiente regulatório para destravar/estimular projetos nessa vertente, bem como

estabelecer as medidas necessárias para potencializar sua recuperação e incorporação na matriz energética do país”.

A Portaria Interministerial n°. 274 disciplina a recuperação de RSU no Brasil e o Decreto n°. 10.117, de 19 de novembro de 2019 trata da qualificação de projetos para ampliação da capacidade de recuperação energética de RSU no Programa de Parcerias de Investimentos da Presidência da República. O Decreto n°.11.412, de 10/02/23 dispõe sobre o conselho deste Programa.

Um acordo de cooperação técnica com as Associação da Frente Brasil de Recuperação Energética de Resíduos – FBRER tem como objetivo impulsionar a recuperação de resíduos sólidos em todo o país.

A continuidade dos leilões regulados para contratação de usinas de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos é importante para estes volumes e porte, permitindo adaptação a novas tecnologias e ganhos de escala. Isso promove a inovação no setor e abre caminho para soluções mais eficientes e sustentáveis.

De acordo com o Diretor da ANEEL, Sandoval Feitosa, a busca pela sustentabilidade econômica nessa forma de geração de energia é essencial, uma vez que os custos envolvidos podem ser mais elevados. É fundamental que esses custos não sejam totalmente repassados aos consumidores de energia, pois a sociedade como um todo se beneficia com a gestão apropriada de resíduos, demonstrando que essa abordagem vai além dos aspectos econômicos, abrangendo também os benefícios ambientais e sociais (ANEEL, 2021).

Para alcançar o sucesso nesse campo, empreendedores que se dedicam à recuperação energética de resíduos sólidos precisam dominar as regras do Setor Elétrico, especialmente aquelas relacionadas à comercialização de energia. Isso assegura um funcionamento eficiente e em conformidade com a legislação vigente. Além disso, a colaboração entre entidades como a ANEEL e o MME com as prefeituras é essencial para disseminar informações sobre os benefícios, oportunidades e modelos de negócios já previstos nas regulamentações em vigor, incluindo a participação em leilões, usinas híbridas e microrredes, bem como chamadas públicas diretas pelas distribuidoras. Isso contribui para o desenvolvimento sustentável e a adoção generalizada da recuperação energética de resíduos sólidos urbanos.

De acordo com o Secretário Nacional de Saneamento do Ministério do Desenvolvimento Regional, Pedro Maranhão, o aproveitamento dos resíduos é outra frente incentivada pelo Ministério do Desenvolvimento Regional, seja para fins

energéticos, ou para CDR, compostagem, óleo combustível, ou para fertilizante (ANEEL, 2021).

Para aprimorar a gestão de resíduos sólidos urbanos, é essencial promover a coleta seletiva e educar os cidadãos sobre a importância da segregação de resíduos. Além disso, uma política pública nacional, envolvendo os entes federativos e a iniciativa privada, deve ser estabelecida, acompanhada por mecanismos de financiamento para projetos de tratamento e recuperação de resíduos. A participação ativa dos catadores de recicláveis e a melhoria na organização e planejamento da implementação por município, incluindo a identificação dos atributos dos resíduos e o aproveitamento da energia elétrica como um subproduto, são elementos-chave para uma gestão eficaz e sustentável (ANEEL 2021).

Conforme Djane Melo, Assessora da Diretoria da ANEEL, a construção de usinas de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos requer um enfoque em custos otimizados, com economias de escala desempenhando um papel crucial na viabilidade dos projetos. Além disso, a geração combinada de energia elétrica e calor é uma estratégia eficaz para aumentar a eficiência econômica, diversificando as fontes de receita (ANEEL, 2021).

3. LEGISLAÇÃO APLICÁVEL

3.1 LEGISLAÇÃO FEDERAL

- **Constituição Federal, de 05/10/1988.** Capítulo VI - Do Meio Ambiente. Título VIII, Capítulo VI. (Disposição Constitucional) Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.
- **Lei n.º 4.717, de 29/06/1965.** Regula a ação popular.
- **Lei n.º 6.496, de 07/12/1977.** Institui a "Anotação de Responsabilidade Técnica" na prestação de serviços de engenharia, de arquitetura e agronomia; autoriza a criação, pelo Conselho Federal de Engenharia, Arquitetura e Agronomia - CONFEA, de uma Mútua de Assistência Profissional; e dá outras providências. Arts. 1º e 3º. Todo contrato, escrito ou verbal, para a execução de obras ou prestação de quaisquer serviços profissionais referentes à Engenharia, à Arquitetura e à Agronomia é acompanhado de Anotação de Responsabilidade Técnica (ART).

- **Lei n.º 6.938, de 31/08/1981.** Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.
- **Lei n.º 7.347, de 24/07/1985.** Disciplina a ação civil pública de responsabilidade por danos causados ao meio ambiente, ao consumidor, a bens e direitos de valor artístico, estético, histórico, turístico e paisagístico (Vetado) e dá outras providências. Arts. 3º e 6º.
- **Lei n.º 8.080, de 19/09/1990.** Dispõe sobre as condições para a promoção, proteção e recuperação da saúde, a organização e o funcionamento dos serviços correspondentes e dá outras providências.
- **Lei n.º 8.666, de 21/06/1993.** Regulamenta o art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências.
- **Lei n.º 9.605, de 12/02/1998.** Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.
- **Lei n.º 9.795, de 27/04/1999.** Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências.
- **Lei n.º 10.848, de 15/03/2004.** Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis n.ºs 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências.
- **Lei n.º 11.079, de 30/12/2004.** Institui normas gerais para licitação e contratação de parceria público-privada no âmbito da administração pública.
- **Lei n.º, de 05/01/2007.** Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei n.º 6.528, de 11 de maio de 1978.
- **Lei n.º 12.187, de 29/12/2009.** Institui a Política Nacional sobre a mudança do clima PNMC e dá outras providências.
- **Lei n.º 12.305, de 02/08/2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências.

- **Lei n.º 12.862, de 17/09/2013.** Altera a Lei n.º 11.445/2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, com o objetivo de incentivar a economia no consumo de água.
- **Lei n.º 14.026, de 15/07/2020.** Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei n.º 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei n.º 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei n.º 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei n.º 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei n.º 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei n.º 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados.
- **Lei n.º 14.300, de 06/01/2022.** Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável meio ambiente (PERS); altera as Leis n.ºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências.
- **Decreto n.º 67, de 04/05/1995.** Aprova o texto da Convenção n.º 170, da Organização Internacional do Trabalho, relativa à segurança na utilização de produtos químicos no trabalho, adotada pela 77ª reunião da Conferência Internacional do Trabalho, em Genebra, em 1990.
- **Decreto n.º 7.217, de 21/06/2010.** Regulamenta a Lei n.º 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências.
- **Decreto n.º 9.373, de 11/05/2018.** Dispõe sobre a alienação, a cessão, a transferência, a destinação e a disposição final ambientalmente adequadas de bens móveis no âmbito da administração pública federal direta, autárquica e fundacional.

- **Decreto n.º 9.578, de 22/11/2018.** Consolida atos normativos editados pelo Poder Executivo federal que dispõem sobre o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima, de que trata a Lei n.º 12.114, de 9 de dezembro de 2009, e a Política Nacional sobre Mudança do Clima, de que trata a Lei n.º 12.187, de 29 de dezembro de 2009.
- **Decreto n.º 10.117, de 19/11/2019.** Dispõe sobre a qualificação de projetos para ampliação da capacidade de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos no âmbito do Programa de Parcerias de Investimentos da Presidência da República.
- **Decreto n.º 10.668, de 08/04/2021.** Altera o Decreto n.º 7.212, de 15 de junho de 2010, que regulamenta a cobrança, a fiscalização, a arrecadação e a administração do Imposto sobre Produtos Industrializados - IPI.
- **Decreto n.º 10.936, de 12/01/2022.** Regulamenta a Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.
- **Decreto n.º 11.043, de 13/04/2022.** Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos.
- **Decreto n.º 11.412, de 10/02/2023.** Dispõe sobre o Conselho do Programa de Parcerias de Investimentos.
- **Resolução Normativa ANEEL n.º 77, de 18//08/2004.** Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidroelétricos e aqueles com base em fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, cuja potência injetada nos sistemas de transmissão e distribuição seja menor ou igual a 30.000Kw.
- **Resolução CONAMA n.º 499, de 06/10/2020.** Dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de]
- **Resolução ANA n.º 79, de 14/06/2021.** Aprova a Norma de Referência n.º 1 para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico, que dispõe sobre o regime, a estrutura e parâmetros da cobrança pela prestação do serviço público de manejo de resíduos sólidos urbanos, bem como os procedimentos e prazos de fixação, reajuste e revisões tarifárias.
- **Resolução Normativa ANEEL n.º 954 de 30/11/2021.** Altera as Resoluções Normativas n.º 77, de 18 de agosto de 2004, n.º 247, de 21 de dezembro de 2006,

n.º 559, de 27 de junho de 2013, n.º 583, de 22 de outubro de 2013, n.º 666, de 23 de junho de 2015 e n.º 876, de 10 de março de 2020, para estabelecer tratamento regulatório para a implantação de Central Geradora Híbrida (UGH) e centrais geradoras associadas.

- **Resolução Normativa ANEEL n.º 965 de 14/12/2021.** Altera a Resolução Normativa n.º. 167, de 10 de outubro de 2005, que estabelece as condições para a comercialização de energia proveniente de Geração Distribuída, aprova o Modelo de Contrato de Geração Distribuída e dá outras providências.
- **Resolução Normativa ANEEL n.º 1.059, de 07/02/2023.** Aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica; altera as Resoluções Normativas n.º 920, de 23 de fevereiro de 2021, 956, de 7 de dezembro de 2021, 1.000, de 7 de dezembro de 2021, e dá outras providências
- **Portaria Interministerial n.º 274, de 30/04/2019.** Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei n.º 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto n.º 7.404, de 2010.
- **Portaria n.º 4.742, de 26/09/2017.** Delega as competências ao titular da Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração.
- **Portaria n.º 307, de 30/04/2019.** Aprova o Programa Nacional Lixão Zero.
- **Portaria n.º 279, de 20/09/2020.** Dispõe sobre os prazos para fins de aprovação tácita dos atos públicos de liberação, de responsabilidade da Secretaria de Regulação e Supervisão da Educação Superior - Seres, conforme o disposto no caput do art. 10 do Decreto n.º 10.178, de 18 de dezembro de 2019.
- **Despacho n.º 1.512, de 21/06/2022.** Dispõe sobre a prorrogação da validade dos Despachos de Registro da Adequabilidade do Sumário Executivo – DRS das Pequenas Centrais Hidrelétricas.

3.2 LEGISLAÇÃO ESTADUAL

- **Constituição Estadual de 1989.** Capítulo VI – Do Meio Ambiente.
- **Lei n.º 13.517, de 04/10/2005.** Dispõe sobre a Política Estadual de Saneamento e estabelece outras providências.

- **Lei n.º 13.557, de 17/11/2005.** Estabelece a Política Estadual de Resíduos Sólidos.
- **Lei n.º 14.364, de 25/01/2008.** Altera o inciso VII do art. 5º da Lei n.º 13.557, de 2005, que dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos.
- **Lei n.º 14.675, de 13/04/2009.** Institui o Código Estadual do Meio Ambiente e estabelece outras providências.
- **Lei n.º 15.112, de 19/01/2010.** Dispõe sobre a proibição do despejo de resíduos sólidos reaproveitáveis e recicláveis em lixões e aterros sanitários.
- **Lei n.º 15.133, de 19/01/2010.** Institui a Política Estadual de Serviços Ambientais e regulamenta o Programa Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais no Estado de Santa Catarina, instituído pela Lei n.º 14.675, de 2009, e estabelece outras providências.
- **Lei n.º 15.251, de 03/08/2010.** Veda o ingresso, no estado de Santa Catarina, de resíduos sólidos com características radioativas e de resíduos orgânicos oriundos de frigoríficos e abatedouros, que apresentem riscos sanitários, tais como a disseminação de febre aftosa ou outras zoonoses. Obrigatoriedade de Manifesto de Transporte de Resíduos – MTR.
- **Lei n.º 15.442, de 17/01/2011.** Altera a ementa e os arts. 1º, 2º, 3º e 4º da lei n.º 15.251, de 2010. Obrigatoriedade de Manifesto de Transporte de Resíduos – MTR e Certificado de Destinação Final – CDF.
- **Decreto n.º 14.250, de 05/06/1981.** Regulamenta os dispositivos da Lei n.º 5.793, referentes à proteção e a melhoria da qualidade ambiental.
- **Decreto n.º 3.272, de 19/05/2010.** Fixa os critérios sobre os quais devem ser elaborados os planos de gerenciamento de resíduos sólidos referentes a resíduos sólidos urbanos municipais, previstos nos Arts. 265 e 266 da Lei n.º 14.675/2009.
- **Instrução Normativa n.º 02, de 10/02/2020.** Trata da disposição final de resíduos sólidos urbanos em Aterros Sanitários.
- **Instrução Normativa n.º 09, de 21/03/2012.** Dispõe sobre normas a serem aplicadas na incineração dos demais tipos de resíduo.
- **Instrução Normativa n.º 34, de 10/02/2009.** Atividades sujeitas ao cadastro ambiental.

- **Instrução Normativa n.º 61, de 27/06/2018.** Disposição final de rejeitos, classe I e IIA, oriundos de outros Estados, em aterros e por incineração sem aproveitamento energético.
- **Instrução Normativa n.º 64, de 09/06/2016.** Define procedimentos e documentação necessária para o reconhecimento dos parâmetros de interesse ambiental executados por Laboratórios, e em conformidade com o disposto no art. 8º, do Decreto Estadual n.º 3.754, de 22 de dezembro de 2010.
- **Instrução Normativa n.º 65, de 10/02/2013.** Define a documentação necessária ao licenciamento e estabelece critérios para apresentação dos planos, programas e projetos para a implantação de atividades diversas.
- **Instrução Normativa n.º 76, de 01/11/2018.** Utilização de resíduos classe I, IIA e IIB como insumos em processos industriais ou construtivos.
- **Instrução Normativa n.º 77, de 13/06/2018.** Transporte de produtos perigosos, transporte de resíduos de saúde, transporte de resíduos ou rejeitos industriais, do comércio e de serviços, Classes I, IIA e IIB.

3.3 LEGISLAÇÃO MUNICIPAL

3.3.1 Águas de Chapecó

- **Lei n.º 1.379, de 04/03/2003.** Autoriza a prefeitura municipal de Águas de Chapecó a participar do Consórcio IBERÊ e dá outras providências.
- **Lei n.º 1.829, de 01/10/2013.** Institui o Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos – PMGIRS do Município de águas de Chapecó e dá outras providências.
- **Lei n.º 1.995, de 26/11/2019.** Dispõe sobre a alteração de designação Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos – PMGIRS, instituído pela Lei municipal n.º 1.829, de 01 de outubro de 2013, no âmbito do município de Águas de Chapecó/SC e dá outras providências.
- **Lei n.º 2.107, de 27/09/2022.** Institui a política municipal do meio ambiente e o sistema municipal de proteção, controle, fiscalização, melhoria da qualidade e licenciamento ambiental, o conselho e o fundo municipal de desenvolvimento agropecuário e meio ambiente, e dá outras providências.

3.3.2 Caxambu do Sul

- **Lei n.º 970, de 17/04/2002.** Autoriza o chefe do poder executivo a terceirizar a coleta de lixo urbano do município e dá outras providências.
- **Lei n.º 1.004, de 29/05/2003.** Autoriza o município de Caxambu do Sul, a participar do consórcio intermunicipal de gerenciamento de ambiental e dá outras providências.
- **Lei n.º 1.263, de 17/07/2012.** Estabelece a Política Municipal de Saneamento Básico e dá outras providências.
- **Lei n.º 1.348, de 06/05/2015.** Aprova o Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos – PMGIRS do município de Caxambu do Sul e dá outras providências.
- **Lei n.º 1.449, de 26/12/2019.** Autoriza o Município de Caxambu do Sul a integrar o Plano Intermunicipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região da Associação dos Municípios do Oeste de Santa Catarina - PIGIRS/AMOSC e dá outras providências.
- **Lei n.º 1.464, de 23/04/2021.** Altera a lei 1.449/2019 e dá outras providências.
- **Lei Complementar n.º 004, de 09/06/2022.** Institui a Política Municipal do Meio Ambiente e o Sistema Municipal de proteção, controle, fiscalização, melhoria da qualidade e licenciamento ambiental, cria o Fundo Municipal do Meio Ambiente e dá outras providências.

3.3.3 Cordilheira Alta

- **Lei n.º 583, de 03/06/2003.** Autoriza o município de Cordilheira Alta a participar do Consórcio Intermunicipal de Gerenciamento Ambiental e dá outras providências.
- **Lei n.º 1.001, de 26/12/2012.** Estabelece a Política Municipal de Saneamento Básico e dá outras providências.
- **Lei complementar n.º 106, de 14/05/2014.** Institui o Plano Diretor municipal de Cordilheira Alta/SC.
- **Lei n.º 1.298, de 03/12/2019.** Aprova o plano intermunicipal de gestão integrada de resíduos sólidos – PIGIRS, e dá outras providências.

3.3.4 Guatambu

- **Lei n.º 232, de 28/07/1995.** Cria o programa municipal de conservação do solo, meio ambiente e mananciais.
- **Lei n.º 420, de 02/12/1999.** Dispõe sobre a criação do Conselho Municipal do Meio Ambiente – CODEMA, e dá outras providências.
- **Lei n.º 530, de 23/06/2003.** Autoriza a participação do município no Consórcio Intermunicipal de Gerenciamento Ambiental, e dá outras providências.
- **Lei n.º 76, de 18/12/2013.** Institui o código sanitário do município de Guatambu e dá outras providências.
- **Lei n.º 957, de 25/10/2013.** Dispõe sobre as normas que regulam as edificações no município de Guatambu e dá outras providências.
- **Lei n.º 1133, de 13/12/2019.** Autoriza o município de Guatambu a integrar o Plano Intermunicipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Consórcio IBERÊ – PIGIRS, e dá outras providências.
- **Lei complementar n.º 145, de 24/03/2022.** Institui a Política Municipal do Meio Ambiente e o sistema municipal de proteção, controle fiscalização, melhora da qualidade e licenciamento ambiental, cria o fundo municipal do meio ambiente e dá outras providências.
- **Lei complementar n.º 150, de 11/04/2022.** Dispõe sobre o código de postura e meio ambiente do município de Guatambu e dá outras providências.

3.3.5 Planalto Alegre

- **Lei n.º 187/1999.** Cria o Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente – CODEMA, e dá outras providências.
- **Lei n.º 317, de 31/03/2003.** Autoriza o município de Planalto Alegre a participar do Consórcio Intermunicipal de Gerenciamento Ambiental e dá outras providências.
- **Lei complementar n.º 23, de 16/12/2010.** Dispõe sobre normas relativas ao plano diretor do município de Planalto Alegre/SC – Lei do plano diretor – e dá outras providências.
- **Lei complementar n.º 25, de 16/12/2010.** Dispõe sobre normas relativas à utilização do espaço e o bem estar público do município de Planalto Alegre – Código de Posturas – e dá outras providências.

- **Lei complementar n.º 26, de 16/12/2010.** Dispõe sobre normas relativas ao parcelamento do solo urbano do município de Planalto Alegre/SC e dá outras providências.
- **Lei n.º 630, de 18/11/2011.** Dispõe sobre a regulamentação do uso de embalagens nos estabelecimentos comerciais do município e dá outras providências.
- **Lei n.º 662/2012.** Estabelece a política municipal de saneamento básico do município de Planalto Alegre e outras providências.
- **Lei complementar n.º 53, de 29/05/2014.** Institui o código sanitário do município de Planalto Alegre e dá outras providências.
- **Lei complementar n.º 65, de 30/05/2017.** Dispõe sobre alterações do código tributário municipal e dá outras providências.
- **Lei n.º 848, de 26/05/2020.** Inclui o novo Plano Interestadual de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos na Lei n.º 748/2015.
- **Lei complementar n.º 90, de 02/06/2021.** Altera a lei complementar n.º 23 e dá outras providências.
- **Lei n.º 898, de 05/05/2022.** Institui o programa municipal de reciclagem de óleos de cozinha de origem vegetal e animal de uso culinário, através de ecopontos de recolhimento e dá outras providências.
- **Lei n.º 913, de 08/11/2022.** Dispõe sobre a criação da semana municipal de incentivo a preservação do meio ambiente no município de Planalto Alegre/SC e dá outras providências.

3.3.6 São Carlos

- **Lei n.º 27, de 20/06/1985.** Cria o conselho municipal de defesa do meio ambiente.
- **Lei n.º 637, de 14/08/1997.** Dispõe sobre um auxílio para a construção de depósitos de lixo tóxico e dá outras providências.
- **Lei n.º 710, de 28/04/1998.** Dispõe sobre atos de limpeza pública e dá outras providências.
- **Lei n.º 1.116, de 13/11/2002.** Autoriza o município de São Carlos a participar do Consórcio Intermunicipal de Gerenciamento Ambiental e dá outras providências.
- **Lei n.º 1360, de 22/05/2006.** Dispõe sobre a política municipal de saneamento ambiental, cria o conselho municipal de saneamento ambiental e o fundo municipal de saneamento ambiental e dá outras providências.

- **Lei n.º 1546, de 19/12/2008.** Cria o Plano Diretor Participativo de São Carlos, e dá outras providências.
- **Lei n.º 1706, de 10/12/2012.** Cria o conselho municipal de agropecuária e meio ambiente do município de São Carlos e dá outras providências.
- **Lei n.º 1.862, de 30/10/2019.** Institui o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMGIRS.
- **Lei complementar n.º 03, de 18/05/2022.** Institui a Política Municipal de Meio Ambiente e o Sistema Municipal de proteção, controle, fiscalização, melhoria de qualidade e licenciamento ambiental, e cria o Fundo Municipal de Meio Ambiente, e dá outras providências.
- **Lei n.º 1.950, de 15/07/2022.** Proíbe jogar lixo nas vias públicas do Município de São Carlos, estado de Santa Catarina, e dá outras providências.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E DO RSU

4.1 MUNICÍPIOS ABRANGIDOS

O trabalho abrangerá as cidades de Cordilheira Alta, Planalto Alegre, Guatambu, Caxambu do Sul, Águas de Chapecó e São Carlos, situadas na região oeste de Santa Catarina. A Figura 15 traz o mapa de localização dos municípios abrangidos.

Figura 15. Mapa de localização dos municípios participantes do estudo



Fonte: Autores (2023).

A seguir, a Tabela 2 reflete a população dos municípios mencionados, com base nos dados fornecidos pelo IBGE por meio dos censos demográficos de 2010 e 2022.

Tabela 2. População dos municípios abrangidos pelo estudo

Município Ano	Águas de Chapecó	Caxambu do Sul	Cordilheira Alta	Guatambu	Planalto Alegre	São Carlos
2010	6.110	4.411	3.767	4.679	2.654	10.291
2022	6.036	4.614	4.781	8.425	2.946	10.282

Fonte: Autores (2023).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RSU

A geração de resíduos engloba todos os materiais que não possuem mais valor, esta eliminação é classificada como geração do resíduo (KREITH; TCHOBANOGLOUS, 2002). Nesta etapa, há a identificação do tipo de resíduo de acordo com sua classe, origem e característica. A geração dos RSU ocorre nas residências urbanas, comércio, varrição de logradouros e vias públicas (BRASIL, 2010).

A caracterização do RSU foi obtida por meio de dados históricos, como subsídio para a seleção dos melhores cenários e rotas tecnológicas, abrangendo a logística, a garantia de matéria prima para a usina geradora.

Atualmente, os serviços relativos à coleta, transporte do RSU dos municípios de Cordilheira Alta, Guatambu, Planalto Alegre e Caxambu do Sul são realizados pela empresa Ambiental, com sede em Maravilha/SC, também local do aterro sanitário onde é feita a disposição final do seu RSU. O município de São Carlos realiza a coleta do RSU por meio da empresa G.L.I. Limpeza Urbana Ltda, com sede em Águas de Chapecó/SC (CONSÓCIO IBERÊ, 2023b).

Ainda, segundo Consórcio IBERÊ, (2023b) é procedido o transbordo em Chapecó/SC, antes de ser encaminhado à Maravilha/SC o RSU dos municípios de Guatambu, Caxambu do Sul e Planalto Alegre, sendo que os resíduos destes municípios são agregados uns aos outros durante o transporte.

A técnica adotada pelos laboratórios para análise do RSU não inclui análise do poder calorífico da matéria orgânica, sendo esta uma das frações predominantes na composição do RSU da área de estudo, o que resultou na definição técnica de obtenção dos dados qualitativos para a caracterização do RSU por dados secundários.

O Quadro 1 a seguir exhibe a média de resíduos coletados em cada município abrangido por este estudo.

Quadro 1. Quantidade de RSU coletado nos municípios de Águas de Chapecó, Caxambu do Sul, Cordilheira Alta, Guatambu, Planalto Alegre e São Carlos

Município	Quantidade de RSU coletado
Águas de Chapecó	3,5 ton/dia

Município	Quantidade de RSU coletado
Caxambu do Sul	1,4 ton/dia
Cordilheira Alta	1,7 ton/dia
Guatambu	1,8 ton/dia
Planalto Alegre	0,6 ton/dia
São Carlos	7 ton/dia
Total	16 ton/dia

Fonte: IBERÊ (2023).

4.2.1 Composição gravimétrica da fonte primária

Os resíduos domiciliares, são aqueles gerados nas residências ou quando gerados em outras atividades, possuem as características compatíveis. Sendo predominantemente os resíduos orgânicos, recicláveis e não recicláveis (BRASIL, 2010). Ainda, os resíduos de limpeza urbana que englobam esta categoria, são de sua maioria, restos de poda, varrição e limpeza de logradouros.

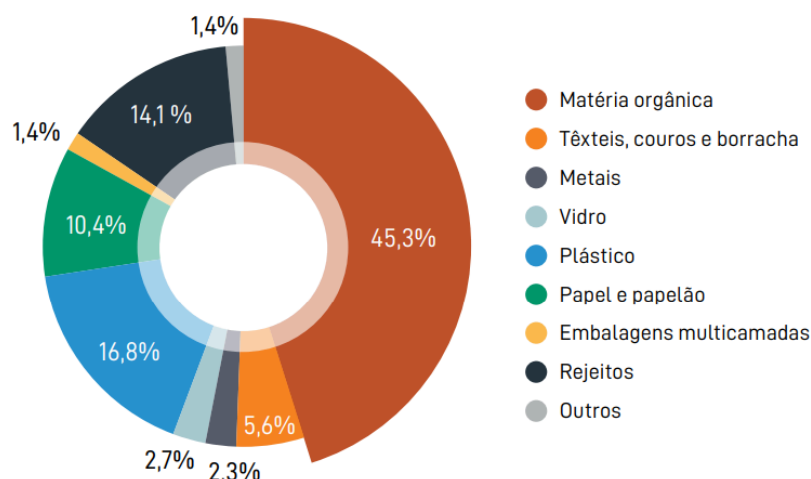
Os resíduos domiciliares são compostos, principalmente, por matéria orgânica, papel, plástico, papelão, vidro, metal e rejeitos, de maneira geral.

A geração e a composição podem variar de acordo com a região, poder aquisitivo da população, padrões de consumo, época do ano, tamanho da cidade, cultura, entre outros fatores que diferem a parcela sólida destes resíduos. Fatores climáticos como a chuva influenciam no aumento do teor de umidade, estações do ano como outono e verão tendem a aumentar o teor de folhas e de embalagens de bebidas, respectivamente. A geração de resíduos também é influenciada pelo poder aquisitivo da população e pelo seu consumo (OLIVO, 2021).

A composição gravimétrica compreende a composição percentual dos materiais que forma o RSU através de mensuração da massa de cada material e calculando o percentual desta massa em relação ao total amostrado. No Brasil, a composição gravimétrica tem grande variação devido ao vasto território nacional e suas diferentes características.

Estima-se que praticamente metade da massa de RSU coletada no país seja composta de matéria orgânica. A Figura 16 apresenta a composição gravimétrica média para o País considerando os principais tipos de materiais (matéria orgânica, metais, vidro, plástico, papel e papelão, embalagem multicamada, têxteis, couros e borrachas e rejeitos. Este estudo foi realizado pela ABRELPE (2020) avaliando a composição gravimétrica de 186 municípios brasileiros.

Figura 16. Composição gravimétrica do RSU no Brasil



Fonte: Adaptado de ABRELPE, 2020.

A fração orgânica ainda permanece como a principal componente dos RSU, com 45,3%. Já os resíduos recicláveis secos somam 35%, sendo compostos principalmente pelos plásticos (16,8%), papel e papelão (10,4%), além dos vidros (2,7%), metais (2,3%), e embalagens multicamadas (1,4%). Os rejeitos, por sua vez, correspondem a 14,1% do total e contemplam, principalmente, os materiais sanitários. Quanto às demais frações, encontram-se os resíduos têxteis, couros e borrachas, com 5,6%, e outros resíduos, também com 1,4%, os quais contemplam diversos materiais teoricamente objetos de logística reversa (ABRELPE, 2020).

Conforme levantamento de dados, o Quadro 2 a seguir apresenta a composição gravimétrica de um estudo da média brasileira realizada pela ABRELPE (2020), ainda pelo mesmo autor para a amostra de municípios do sul do Brasil. Para amostra de municípios de Santa Catarina utilizou-se levantamento de dados de Guadagnin (2014) com estudo de uma parcela de municípios do sul de Santa Catarina.

Quadro 2. Composição gravimétrica em diferentes municípios do Brasil

	Brasil ¹	Sul Brasil ¹	SC ²	Renda ^{1*}
Matéria Orgânica	45,3%	42%	46%	45,7%
Papel/Papelão	10,4%	12,4%	10,69%	10,6%
Plásticos	16,8%	16,9%	16,53%	17,4%
Vidros	2,7%	3,3%	3,89%	2,7%
Metais	2,3%	2,7%	4,11%	2,4%
Rejeitos	14,1%	13%	10,31%	13,2%
Embalagens multicamada	1,4%	1,8%	2,46%	1,4%
Têxtis	5,6%	6,1%	4,29%	5,4%
Outros	1,4%	0,8%	1,72%	0,9%

* A renda média *per capita* dos municípios abrangidos pelo estudo é de 2,3 salários mínimos, o que segundo enquadramento da ABRELPE é considerado alta renda, portanto, a faixa de análise apresentou a composição gravimétrica média para municípios de alta renda.

Fonte: ¹ABRELPE (2020); ²Guadagnin (2014).

Pode-se observar no quadro acima a baixa variação da composição gravimétrica entre as amostras, principalmente entre o quantitativo de matéria orgânica e recicláveis. Portanto, uma média entre estes estudos pode ser aplicada para fins de estimativa da composição gravimétrica dos municípios integrantes deste estudo.

4.2.2 Tipificação do RSU

A tipificação de RSU pode ser muito extensa dependendo do grau de aprofundamento do estudo, mas de maneira geral a maioria dos autores e publicações oficiais do governo, tem-se como principais tipos de resíduos: matéria orgânica, têxteis, embalagens multicamada, rejeitos e outros.

- **Matéria orgânica:** contempla sobras e perdas de alimentos, resíduos verdes e madeiras.
- **Papel e papelão:** inclui jornais, revistas, encartes, impressos em geral, cartas, envelopes, folhas de cadernos, papel kraft, rascunhos em sulfite, refiles gráficos, fotocópias, cartolina, cartão, cartazes, aparas de papel.
- **Plásticos:** possuem diversos tipos e composições, de acordo com a sua finalidade, sendo mais comuns na reciclagem, os seguintes: PET (Tereftalato de Polietileno), PEAD (Polietileno de Alta Densidade), PVC (Policloreto de Vinila), PEBD (Polietileno de Baixa Densidade), PP (Polipropileno), PS (Poliestireno).
- **Vidros:** abrange vidros comuns (planos), garrafas, frascos, vidros laminados, copos, janelas, dentre outros.
- **Têxteis, couros e borrachas:** inclui retalhos no geral, peças de roupas, uniformes das agroindústrias, calçados, mochila, tênis, pedaços de couro e borracha.
- **Embalagens multicamadas:** consistem em embalagens compostas por mais de um tipo de material.
- **Rejeitos:** incluem resíduos sanitários, outros materiais que não foram passíveis de identificação, bem como recicláveis contaminados que não permitiram a sua separação dos recicláveis “limpos”.
- **Outros:** contempla os resíduos identificados e que não deveriam estar no fluxo de RSU como resíduos de saúde, eletroeletrônicos, pilhas e baterias, resíduos perigosos, resíduos de construção civil, pneus, óleos e graxas, embalagens de agrotóxico e outros resíduos perigosos.

4.2.3 Poder calorífico

O poder calorífico é definido como a quantidade de energia em forma de calor liberada durante a combustão de uma unidade de massa de um material. No Sistema Internacional, o poder calorífico é expresso em joules por grama (J/g) ou quilojoules por quilograma (kJ/kg), embora seja frequentemente representado em quilocalorias por quilograma (kcal/kg).

O poder calorífico pode ser dividido em duas categorias: superior e inferior. O poder calorífico superior refere-se à combustão que ocorre a volume constante, na qual a água produzida durante a queima é condensada, e o calor resultante desse processo de condensação é recuperado. Por outro lado, o poder calorífico inferior representa a energia verdadeiramente disponível por unidade de massa de combustível após a subtração das perdas causadas pela evaporação da água. O poder calorífico é uma das características mais significativas a serem consideradas ao avaliar um combustível.

De acordo com Poli (2013) *apud* ABNT (2004), o Poder Calorífico Inferior (PCI) pode ser definido como “calor liberado pela queima de uma unidade de massa do combustível, a uma pressão constante de uma atmosfera, permanecendo a água no estado vapor”, ou seja, o PCI indica a capacidade potencial de um material desprender determinada quantidade de calor, quando submetido à queima.

Quando se trata de resíduos sólidos urbanos, o Poder Calorífico Inferior (PCI) desempenha um papel fundamental na análise do custo da energia gerada. Ele não apenas varia de cidade para cidade, mas também de ano para ano. Portanto, a capacidade de aproveitar os resíduos como fonte de energia está diretamente ligada ao seu PCI, que é a variável que determina a quantidade efetiva de energia contida nos resíduos.

O Quadro 3 a seguir apresenta os valores do Poder Calorífico Inferior de resíduos sólidos urbanos, categorizados por tipo de material, obtidos com a análise e consolidação de pesquisa dos autores citados.

Quadro 3. Valores de PCI em kcal/Kg encontrados em RSU

Bibliografias	Soares (2011)	Quezado (2010)	EPE (2008)	Themelis (2003)	De Nogueira (2015)	Themelis e Kaufman (2004)
Material Orgânico	1300	1363	1310	1310	1310	1310
Roupas/Tecido	4170	-	3555	3480	3480	-
Plástico	7830	7184	6300	6300	6300	6300
Papel/Papelão	3780	3332	4030	4030	4030	4030
Isopor	9170	-	-	-	-	-
Borracha	-	-	6780	6780	6780	-

Bibliografias	Soares (2011)	Quezado (2010)	EPE (2008)	Themelis (2003)	De Nogueira (2015)	Themelis e Kaufman (2004)
Couro	4467	-	-	3630	3630	-
Madeira	-	-	2520	2520	2520	-
Vidro	48	-	-	-	-	-
Espuma	341	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelos autores, (2023).

No que se refere aos resíduos sólidos urbanos, o poder calorífico inferior é resultado das contribuições dos poderes caloríficos específicos de cada material. Portanto, o resultado do poder calorífico inferior do RSU é obtido por meio da soma do valor de PCI de cada resíduo.

Para estimativa do PCI foi utilizada a média da composição gravimétrica dos resultados apresentados no Quadro 02 e aplicado à geração média do RSU dos municípios apresentados no Quadro 01.

Portanto, a gravimetria e o poder calorífico inferior do RSU baseado em dados secundários dos autores apresentados neste estudo é apresentado no Quadro 4 a seguir.

Quadro 4. Estimativa de poder calorífico do RSU dos municípios abrangidos no estudo

Tipificação	Quantidade de RSU (ton/mês)	Gravimetria (%)	PCI (Kcal/Ton)	PCI Total (Kcal/mês)
Matéria Orgânica	215,695	44,75%	13,17	2840,70
Papel/Papelão	53,1164	11,02%	3,87	205,56
Plásticos	81,5062	16,91%	6,7	546,09
Vidros	15,1348	3,14%	0,048	0,73
Metais	13,8816	2,88%	0	0,00
Rejeitos	60,973	12,65%	0	0,00
Embalagens multicamada	8,4832	1,76%	0	0,00
Têxtis	25,7388	5,34%	3,67	94,46
Outros	23,2324	4,82%	0	0,00

Fonte: Elaborado pelos autores, (2023).

5. PROJEÇÃO DE ACRÉSCIMO DE RESÍDUOS ATÉ 2043

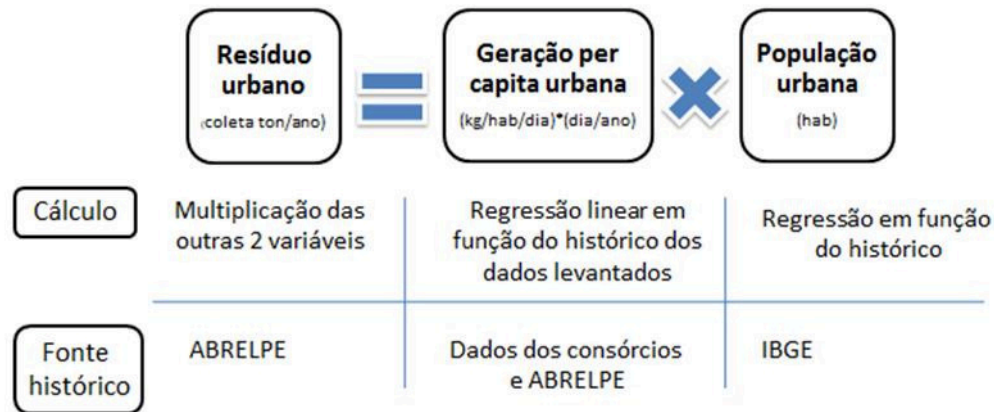
5.1 MODELO

Para realizar a estimativa de geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) durante o período do projeto, são considerados os dados fornecidos pela ABRELPE e pelo IBGE. Primeiramente é realizada a projeção populacional para cada ano, num total de 20 anos, partindo dos dados obtidos pelo IBGE. Em seguida, a quantidade de RSU *per capita* gerada ao longo de cada um dos 20 anos de projeção, com base nas fontes de dados da

ABRELPE. Por fim, a geração *per capita* estimada para cada ano será multiplicada pela população total correspondente a esse ano. Esse processo permite calcular a estimativa da geração total de RSU para cada ano do projeto, totalizando 20 anos. A

Figura 17 apresenta o modelo e as fontes utilizadas para cada variável escolhida.

Figura 17. Modelo e fontes utilizadas para cada variável escolhida



Fonte: Autores (2023).

5.2 POPULAÇÃO

A projeção da estimativa populacional para um período de 20 anos foi desenvolvida utilizando três métodos distintos: projeção aritmética, projeção geométrica e, quando aplicável, a Taxa Decrescente de Crescimento, sujeita determinados requisitos para sua validade. A Tabela 3 apresenta as principais características de cada método, passíveis de resolução por meio de análise estatística de regressão.

Tabela 3. Metodologias matemáticas para projeção populacional

Método	Descrição	Taxa de Crescimento ($\frac{dP}{dt}$)	Fórmula da projeção (Pt)	Coefficientes
Projeção Aritmética	Crescimento populacional segundo uma taxa constante.	Ka	$P0 + Ka \cdot (t - t0)$	$Ka = \frac{P2 - P0}{t2 - t0}$
Projeção Geométrica	Crescimento populacional função da população existente a cada instante.	$Kg \cdot P$	$P0 \cdot e^{Kg \cdot (t-t0)}$ Ou $P0 \cdot (1 + i)^{(t-t0)}$	$Kg = \frac{\ln P2 - \ln P0}{t2 - t0}$ Ou $i = e^{Kg} - 1$
Taxa Decrescente de Crescimento	A medida em que a cidade cresce, a taxa de crescimento torna-se menor. A população tende a um valor de saturação.	$Kd \cdot (Ps - P)$	$P0 + (Ps - P0) \cdot [1 - e^{-Kd \cdot (t-t0)}]$	$Ps = \frac{2 \cdot P0 \cdot P1 \cdot P2 - P1^2 \cdot (P0 + P2)}{P0 \cdot P2 - P1^2}$ $Kd = \frac{-\ln \left[\frac{Ps - P2}{Ps - P0} \right]}{T2 - T0}$

Fonte: Adaptado parcialmente de Qasim (1985)

Neste estudo foi utilizado como dados observados os censos populacionais realizados pelo IBGE nos municípios participantes para os anos de 2000, 2010 e 2022. Após a aplicação de cada método foi conduzida uma análise para determinar qual deles oferece a melhor representação e coerência com o histórico de crescimento populacional observado nos municípios até o momento. Importante notar que, em alguns municípios, não foi viável aplicar o método de Taxa Decrescente de Crescimento devido à não conformidade com os requisitos $P0 < P1 < P2$ e/ou $(P1)^2 > P0 \times P2$.

5.2.1 Águas de Chapecó

De acordo com o último censo realizado pelo IBGE em 2022, o município de Águas de Chapecó contava com uma população de 6.036 habitantes. Na Tabela 4 são apresentadas as projeções populacionais até o ano de 2043, obtidas por meio dos métodos aritmético e geométrico de estimativa demográfica.

Tabela 4. Estimativa populacional – Águas de Chapecó

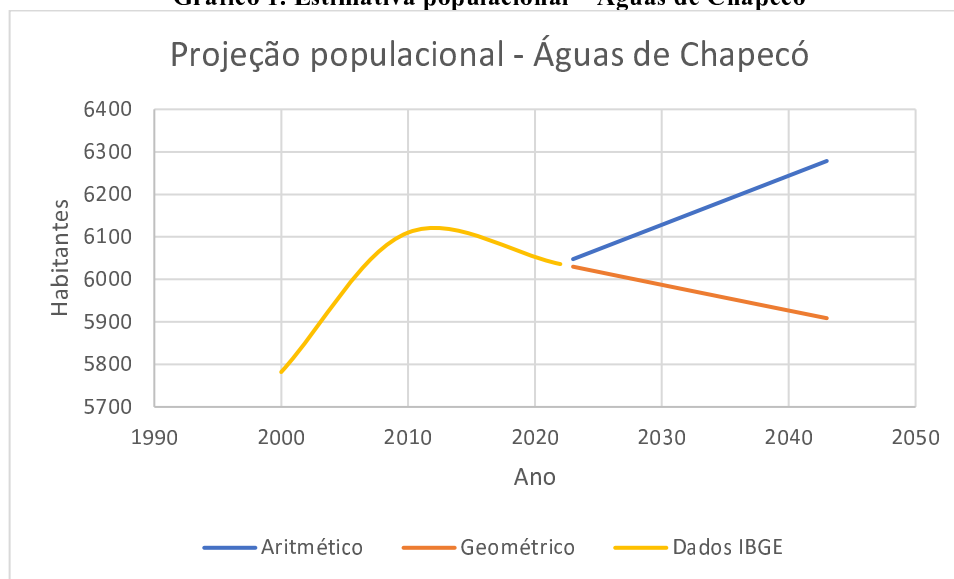
Ano	Método	
	Aritmético	Geométrico
2023	6048	6030
2024	6059	6024
2025	6071	6018
2026	6082	6012
2027	6094	6005
2028	6105	5999
2029	6117	5993
2030	6128	5987
2031	6140	5981
2032	6151	5975
2033	6163	5969
2034	6175	5963
2035	6186	5957
2036	6198	5951
2037	6209	5945
2038	6221	5939
2039	6232	5933
2040	6244	5927
2041	6255	5921
2042	6267	5915
2043	6278	5909

Fonte: Autores (2023).

Nota-se que, de acordo com o método geométrico, a população experimenta uma tendência de decréscimo, refletindo o comportamento observado nos anos precedentes, enquanto o modelo aritmético sugere um crescimento constante.

O Gráfico 1. ilustra as estimativas, permitindo uma comparação com os dados reais observados nos anos de 2000, 2010 e 2022. Após análise, chegou-se à conclusão de que, para o município de Águas de Chapecó, o método mais adequado é o geométrico, dada a consistência do comportamento populacional nos últimos anos.

Gráfico 1. Estimativa populacional – Águas de Chapecó



Fonte: Autores (2023).

Examinando os dados do Caderno do Desenvolvimento em Águas de Chapecó, segundo SEBRAE (2019), identificou-se um claro indício de envelhecimento da população local, sendo notável uma redução de 22% na faixa etária com menos de 9 anos entre os anos de 2000 e 2010. Além disso, a população apresentou um aumento de 0,5% de 2000 para 2010, seguido de uma diminuição de 1,21% de 2010 para 2022, de acordo com informações do IBGE (2022).

5.2.2 Caxambu do Sul

No que diz respeito ao município de Caxambu do Sul foi empregado o método aritmético e geométrico na elaboração de estimativas populacionais até o ano de 2043. Os resultados dessas estimativas são evidenciados na Tabela 5.

Tabela 5. Estimativa populacional – Caxambu do Sul

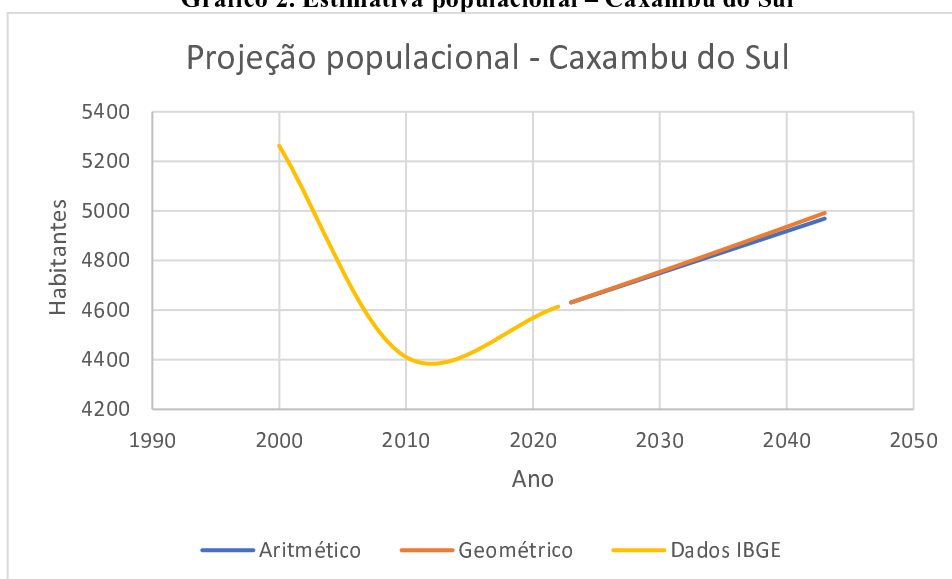
Ano	Método	
	Aritmético	Geométrico
2023	5652	4631

Ano	Método	
	Aritmético	Geométrico
2024	5669	4649
2025	5686	4666
2026	5703	4684
2027	5720	4701
2028	5737	4719
2029	5754	4737
2030	5771	4754
2031	5787	4772
2032	5804	4790
2033	5821	4808
2034	5838	4826
2035	5855	4844
2036	5872	4863
2037	5889	4881
2038	5906	4899
2039	5923	4918
2040	5940	4936
2041	5957	4955
2042	5974	4973
2043	5990	4992

Fonte: Autores (2023).

O Gráfico 2 permite uma comparação das projeções populacionais realizadas com os dados efetivamente registrados nos anos de 2000, 2010 e 2022.

Gráfico 2. Estimativa populacional – Caxambu do Sul



Fonte: Autores (2023).

Após análise foi concluído que, para Caxambu do Sul, o método geométrico se mostrou mais apropriado. Ambos os métodos forneceram resultados semelhantes, alinhando-se com as tendências populacionais observadas anteriormente.

Destaca-se que, no ano de 2010, foi constatada uma redução populacional de 1,75% em relação a 2000, enquanto o ano de 2022 apresentou um crescimento de 4,6%, de acordo com dados provenientes do IBGE (2022) e do SEBRAE (2019).

5.2.3 Cordilheira Alta

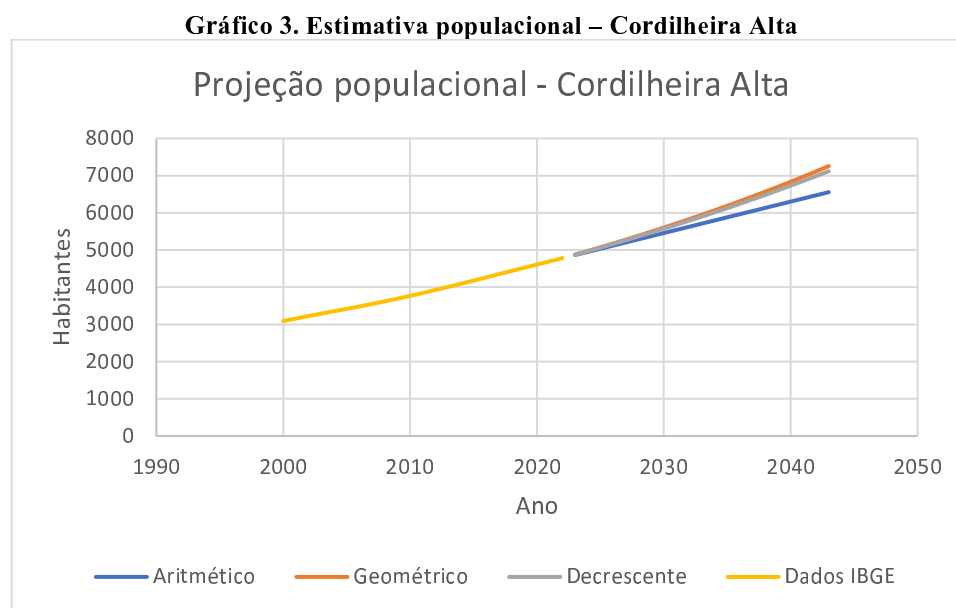
Para o município de Cordilheira Alta foram empregados três métodos distintos para a realização das estimativas populacionais, quais sejam: o método aritmético, o método geométrico e o método de taxa decrescente de crescimento. Os resultados dessas estimativas estão representados na Tabela 6.

Tabela 6. Estimativa populacional – Cordilheira Alta

Ano	Método		
	Aritmético	Geométrico	Decrescente
2023	5037	4877	4874
2024	5121	4975	4969
2025	5206	5075	5065
2026	5290	5176	5163
2027	5375	5280	5263
2028	5459	5386	5365
2029	5544	5494	5468
2030	5628	5604	5573
2031	5713	5717	5680
2032	5797	5832	5789
2033	5882	5949	5899
2034	5966	6068	6012
2035	6051	6190	6127
2036	6135	6314	6243
2037	6220	6441	6362
2038	6304	6570	6483
2039	6389	6702	6605
2040	6473	6836	6730
2041	6558	6973	6858
2042	6642	7113	6987
2043	6727	7256	7119

Fonte: Autores (2023).

A partir do Gráfico 3 é possível verificar as estimativas realizadas e compará-las aos dados observados nos anos de 2000, 2010 e 2022.



O método adotado para a estimativa populacional para o município de Cordilheira Alta é a taxa decrescente de crescimento, pois este considera que a população tende a um estado de saturação. Ao observar dos dados do IBGE, verifica-se que a população do município sofreu um aumento de 1,99% de 2000 para 2010 e de 26,78% de 2010 para 2022.

Após análise, concluiu-se que o método mais apropriado para estimar a população de Cordilheira Alta é o método de taxa decrescente de crescimento, pois considera que a população tende a alcançar um estado de saturação. A escolha do método leva em consideração as seguintes observações: entre os anos 2000 e 2010, a população do município registrou um aumento de 1,99%, enquanto entre 2010 e 2022, o crescimento foi substancial, atingindo 26,78%, conforme dados fornecidos pelo IBGE.

Dessa forma, a adoção do método de taxa decrescente de crescimento se justifica pela capacidade de representar adequadamente a dinâmica populacional de Cordilheira Alta ao longo dos anos.

5.2.4 Guatambu

No que diz respeito ao município Guatambu foram adotados os métodos aritmético e geométrico para realizar estimativas populacionais até o ano de 2043. As estimativas obtidas estão representadas na Tabela 7 a seguir.

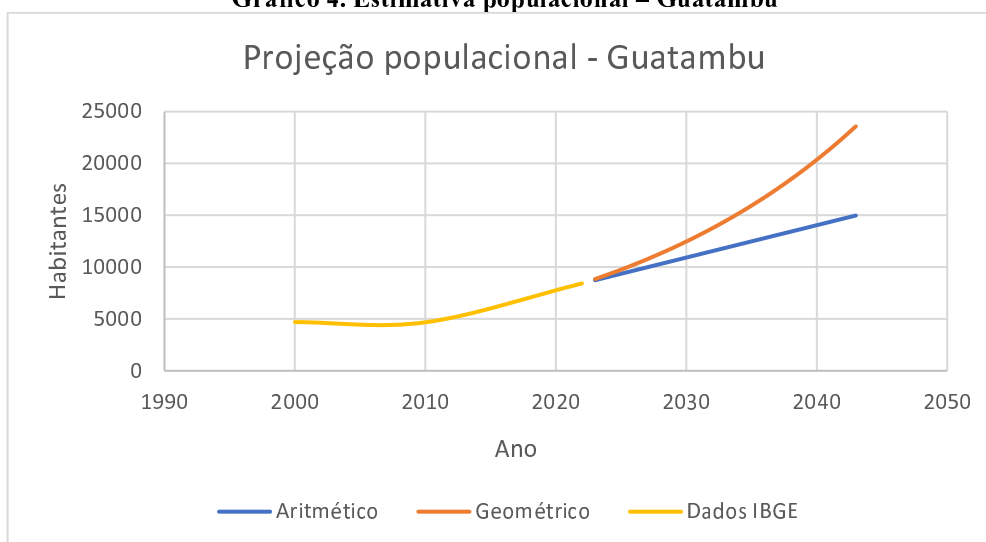
Tabela 7. Estimativa populacional – Guatambu

Ano	Método	
	Aritmético	Geométrico
2023	8737	8848
2024	9049	9293
2025	9362	9759
2026	9674	10250
2027	9986	10764
2028	10298	11305
2029	10610	11873
2030	10922	12469
2031	11235	13096
2032	11547	13754
2033	11859	14444
2034	12171	15170
2035	12483	15932
2036	12795	16732
2037	13108	17573
2038	13420	18455
2039	13732	19383
2040	14044	20356
2041	14356	21379
2042	14668	22452
2043	14981	23580

Fonte: Autores (2023).

Através do Gráfico 4 apresentado a seguir foi realizada a comparação das projeções realizadas com os dados reais observados nos anos de 2000, 2010 e 2022.

Gráfico 4. Estimativa populacional – Guatambu



Fonte: Autores (2023).

Após análise, determinou-se que o método mais adequado para a projeção populacional de Guatambu é o método geométrico, uma vez que reflete de forma mais precisa o crescimento populacional observado nos anos anteriores. Ao comparar a população do município entre os anos 2000 e 2010, nota-se uma variação mínima, com apenas um decréscimo de 0,05% (SEBRAE, 2019). Por outro lado, ao comparar o ano de 2010 com 2022, Guatambu experimentou um notável aumento de 80,06% (IBGE, 2022).

Diante desses resultados, a escolha do método geométrico se justifica pela sua capacidade de captar as tendências de crescimento observadas no município, evidenciando um aumento significativo em um período mais recente.

5.2.5 Planalto Alegre

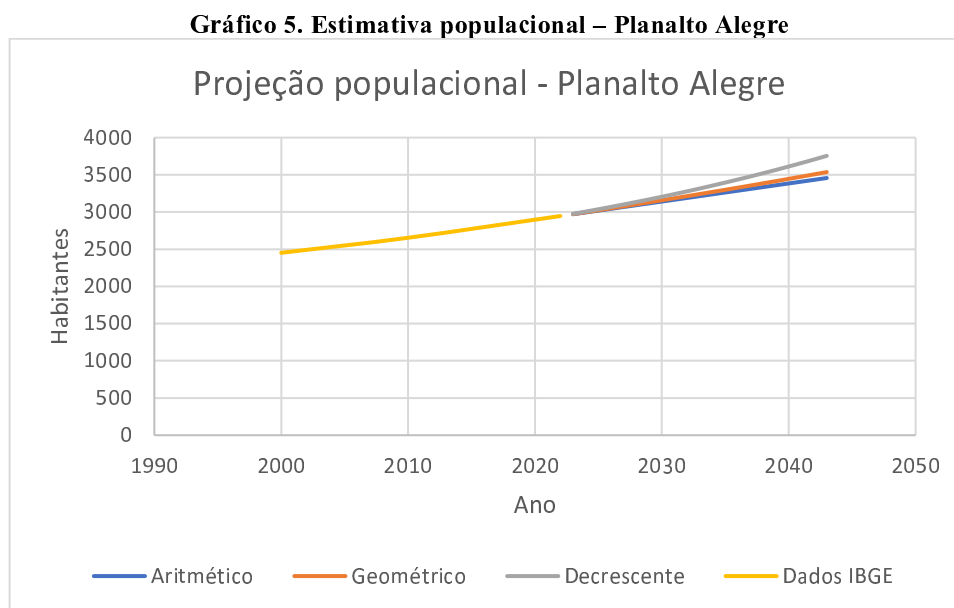
Em relação ao município de Planalto Alegre, foram empregados os métodos aritmético e geométrico para realizar estimativas populacionais até o ano de 2043, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8. Estimativa populacional – Planalto Alegre

Ano	Método		
	Aritmético	Geométrico	Decrescente
2023	2970	2972	2976
2024	2995	2998	3006
2025	3019	3024	3037
2026	3043	3050	3069
2027	3068	3077	3102
2028	3092	3104	3135
2029	3116	3131	3170
2030	3141	3158	3205
2031	3165	3186	3241
2032	3189	3214	3278
2033	3214	3242	3317
2034	3238	3270	3356
2035	3262	3299	3396
2036	3287	3328	3437
2037	3311	3357	3479
2038	3335	3386	3522
2039	3360	3415	3566
2040	3384	3445	3612
2041	3408	3475	3658
2042	3433	3506	3706
2043	3457	3536	3755

Fonte: Autores (2023).

Os resultados das estimativas realizadas estão representados no Gráfico 5, possibilitando a comparação com os dados reais observados nos anos de 2000, 2010 e 2022.



Após análise, determinou-se que o método de estimativa populacional mais apropriado para o município de Planalto Alegre é o método de taxa decrescente de crescimento. Essa escolha se baseia na análise dos dados fornecidos pelo IBGE (2022), que revela um aumento populacional de 0,79% entre os anos de 2000 e 2010 e um aumento mais significativo de 11,17% no período de 2010 a 2022. Dessa forma, o método de taxa decrescente de crescimento se mostra adequado para representar a dinâmica populacional de Planalto Alegre.

5.2.6 São Carlos

No estudo realizado para o município de São Carlos foram aplicados os métodos aritmético e geométrico para realizar estimativas populacionais até o ano de 2043, conforme apresentado na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9. Estimativa populacional – São Carlos

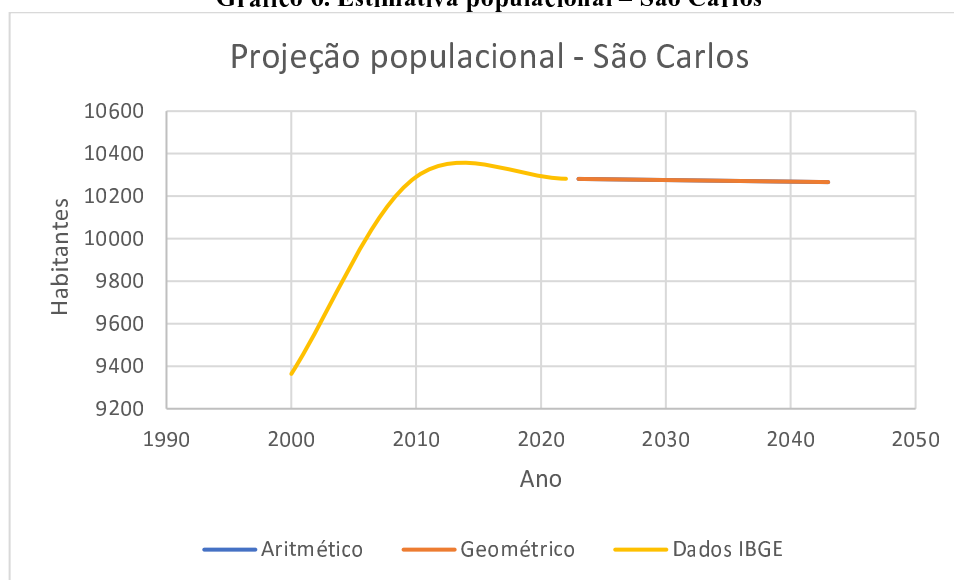
Ano	Método	
	Aritmético	Geométrico
2023	10281	10281
2024	10281	10281
2025	10280	10280
2026	10279	10279
2027	10278	10278

Ano	Método	
	Aritmético	Geométrico
2028	10278	10278
2029	10277	10277
2030	10276	10276
2031	10275	10275
2032	10275	10275
2033	10274	10274
2034	10273	10273
2035	10272	10272
2036	10272	10272
2037	10271	10271
2038	10270	10270
2039	10269	10269
2040	10269	10269
2041	10268	10268
2042	10267	10267
2043	10266	10266

Fonte: Autores (2023).

Os resultados dessas estimativas estão apresentados no Gráfico 6, permitindo a comparação com os dados reais registrados nos anos de 2000, 2010 e 2022.

Gráfico 6. Estimativa populacional – São Carlos



Fonte: Autores (2023).

Destaca-se que, para o município de São Carlos, ambos os métodos proporcionam resultados idênticos na estimativa populacional devido ao comportamento consistente observado nos anos anteriores. É possível constatar que o município experimentou um aumento de 0,95% na população ao comparar os anos de 2000 e 2010. Entretanto, houve

um leve decréscimo de 0,09% na população ao comparar 2010 com 2022 (IBGE 2022; SEBRAE, 2019).

Essa estabilidade nos resultados dos métodos reflete a relativa estagnação do crescimento populacional de São Carlos nos últimos anos, tornando-os igualmente aplicáveis na projeção futura da população do município.

5.2.7 Resultado

No âmbito do projeto foi conduzida uma análise, incluindo estimativas populacionais para cada município envolvido. A abordagem adotada levou em consideração as particularidades de cada localidade, aplicando o método mais apropriado para cada uma delas. Para obter o total da população abrangida pelo projeto, foi necessário somar o número de habitantes de cada município, conforme registrado na Tabela 10.

Tabela 10. Estimativa populacional até o ano de 2043 para os municípios de Águas de Chapecó, Caxambu do Sul, Cordilheira Alta, Guatambu, Planalto Alegre e São Carlos

Ano	Municípios						Total
	Águas de Chapecó	Caxambu do Sul	Cordilheira Alta	Guatambu	Planalto Alegre	São Carlos	
2023	6030	4631	4874	8848	2976	10281	37640
2024	6024	4649	4969	9293	3006	10281	38220
2025	6018	4666	5065	9759	3037	10280	38825
2026	6012	4684	5163	10250	3069	10279	39456
2027	6005	4701	5263	10764	3102	10278	40114
2028	5999	4719	5365	11305	3135	10278	40801
2029	5993	4737	5468	11873	3170	10277	41517
2030	5987	4754	5573	12469	3205	10276	42265
2031	5981	4772	5680	13096	3241	10275	43046
2032	5975	4790	5789	13754	3278	10275	43861
2033	5969	4808	5899	14444	3317	10274	44711
2034	5963	4826	6012	15170	3356	10273	45600
2035	5957	4844	6127	15932	3396	10272	46528
2036	5951	4863	6243	16732	3437	10272	47497
2037	5945	4881	6362	17573	3479	10271	48510
2038	5939	4899	6483	18455	3522	10270	49568
2039	5933	4918	6605	19383	3566	10269	50674
2040	5927	4936	6730	20356	3612	10269	51830
2041	5921	4955	6858	21379	3658	10268	53038
2042	5915	4973	6987	22452	3706	10267	54300
2043	5909	4992	7119	23580	3755	10266	55621

Fonte: Autores (2023).

Esta tabela detalha o número de habitantes em cada município para cada ano de estimativa, bem como a progressiva soma de todos os municípios ao longo dos anos, culminando no ano final do projeto, considerado 2043. Essa análise permitirá um planejamento eficaz e adequado às necessidades de cada localidade, garantindo o sucesso do projeto a longo prazo.

5.3 GERAÇÃO DE RSU *PER CAPITA* DE 2023 A 2043

Os dados a seguir oferecem uma síntese sobre a produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil ao longo de 2022, totalizando cerca de 81,8 milhões de toneladas, equivalente a 224 mil toneladas por dia. Em média, cada brasileiro gerou aproximadamente 1,043 kg de resíduos por dia (ABRELPE, 2022).

Notavelmente, as variações regionais na geração diária *per capita* de resíduos são evidentes, com a região sul registrando 0,776 em 2022 e 0,802 em 2021. A análise dos dados de 2022 revela uma tendência de queda na quantidade de RSU gerados no país, possivelmente relacionada às mudanças nas dinâmicas sociais, como a retomada da produção de resíduos em empresas, escolas e escritórios, redução do uso de serviços de entrega em comparação ao período de isolamento social e flutuações no poder de compra de parte da população (ABRELPE, 2022).

Para a realização da estimativa de geração de RSU *per capita*, foram analisados dados dos panoramas anuais realizados pela ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais partindo do ano de 2012. A Tabela 11 mostra a geração de RSU dos anos de 2012 a 2021.

Tabela 11. Geração de RSU *per capita* (kg/hab./dia)

Ano	Geração <i>per capita</i>	
	Brasil	Região Sul
2012	1,037	0,77
2013	1,041	0,761
2014	1,062	0,77
2015	1,071	0,773
2016	1,04	0,752
2017	1,035	0,757
2018	1,039	0,759
2019	1,039	0,759
2020	1,068	0,805
2021	1,043	0,776

Fonte: Adaptado de ABRELPE (2022).

Com base na análise da geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) *per capita* na Região Sul, observou-se que a quantidade de RSU gerada por habitante apresentou variações de até 7,05% ao longo do período analisado. Essa variação é representativa das mudanças na quantidade média de resíduos produzidos por cada indivíduo na região.

Além disso, foi desenvolvida uma equação representativa para estimar a quantidade de geração *per capita* de RSU para os próximos anos, equação leva em consideração os dados históricos e permite fazer previsões mais precisas sobre a geração futura de RSU na Região Sul, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12. Estimativa de geração de RSU na Região Sul *per capita*

Ano	Geração <i>per capita</i> (Kg/hab./dia)
2022	0,7769
2023	0,7785
2024	0,7801
2025	0,7817
2026	0,7833
2027	0,7849
2028	0,7865
2029	0,7881
2030	0,7897
2031	0,7913
2032	0,7929
2033	0,7945
2034	0,7961
2035	0,7977
2036	0,7993
2037	0,8009
2038	0,8025
2039	0,8041
2040	0,8057
2041	0,8073
2042	0,8089
2043	0,8105

Fonte: Autores (2023).

A próxima etapa envolve multiplicar a estimativa *per capita* anual de geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) pelo número total de habitantes abrangidos pelo projeto em cada ano, a fim de determinar a quantidade de resíduos a ser gerada ao longo do projeto, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13. Soma da quantidade de RSU prospectada por ano até 2023 nos municípios de Águas de Chapecó, Caxambu do Sul, Cordilheira alta, Guatambu, Planalto Alegre e São Carlos

Ano	Geração <i>per capita</i> (kg/hab./dia)	Habitantes	Total RSU gerado (kg/dia)
2023	0,7785	37640	29302,74
2024	0,7801	38220	29815,42
2025	0,7817	38825	30349,5
2026	0,7833	39456	30905,88
2027	0,7849	40114	31485,48
2028	0,7865	40801	32089,99
2029	0,7881	41517	32719,55
2030	0,7897	42265	33376,67
2031	0,7913	43046	34062,3
2032	0,7929	43861	34777,39
2033	0,7945	44711	35522,89
2034	0,7961	45600	36302,16
2035	0,7977	46528	37115,39
2036	0,7993	47497	37964,35
2037	0,8009	48510	38851,66
2038	0,8025	49568	39778,32
2039	0,8041	50674	40746,96
2040	0,8057	51830	41759,43
2041	0,8073	53038	42817,58
2042	0,8089	54300	43923,27
2043	0,8105	55621	45080,82

Fonte: Autores (2023).

A Tabela 14 a seguir exhibe a média de resíduos coletados em cada município incluído no estudo durante o ano de 2022, juntamente com a totalização diária.

Tabela 14. Quantidade de RSU coletado nos municípios de Águas de Chapecó, Caxambu do Sul, Cordilheira Alta, Guatambu, Planalto Alegre e São Carlos

Município	Quantidade de RSU coletado
Águas de Chapecó	3,5 ton/dia
Caxambu do Sul	1,4 ton/dia
Cordilheira Alta	1,7 ton/dia
Guatambu	1,8 ton/dia
Planalto Alegre	0,6 ton/dia
São Carlos	7 ton/dia
Total	16 ton/dia

Fonte: IBERÊ (2023).

6. CUSTO DE COLETA, TRANSPORTE E DESTINAÇÃO DO RSU EM ATERRO SANITÁRIO – CENÁRIO ATUAL/2023

Os dados para a elaboração das estimativas de custo de transporte para obtenção e destinação dos resíduos sólidos urbanos se baseiam nos dados disponibilizados pelo Consórcio IBERÊ (2023a), assim como, em diálogo com executivos para validação dos investimentos valores foram realizadas através de ofícios junto as prefeituras de cada município e entrevistas telefônicas.

A Tabela 15 a seguir apresenta o valor pago pela coleta, valor arrecadado dos municípios, quando disponível assim como, o valor de coleta e disposição final do RSU em aterro sanitário para cada um dos municípios abrangidos pelo estudo.

Tabela 15. Valor pago para coleta e disposição de resíduos e o valor arrecadados dos municípios nos municípios de Águas de Chapecó, Caxambu do Sul, Cordilheira Alta, Guatambu, Planalto Alegre e São Carlos

Município	Valor pago por ano para empresas de coleta, transporte e disposição	Valor arrecadado pelo município para pagamento do serviço de coleta, transporte e disposição	Valor da coleta RSU (R\$)	Valor da Disposição RSU em aterro sanitário (R\$)
Águas de Chapecó	417.625,92	84.942,01	417.625,92	
Caxambu do Sul	371.832,00	200.000,00	281.170,80	90.668,88
Cordilheira Alta	440.586,36	A partir de 2024 arrecadará valor equivalente ao efetivamente gasto	440.596,36	
Guatambu	291.436,35	Não apresentado		
Planalto Alegre	386.512,80	50.000,00	217.523,40	97.156,56
São Carlos	796.440,00	Não apresentado	796.440,00	
Total (R\$)		2.704.433,43		

Fonte: CONSÓRCIO IBERÊ (2023a) E AMBIENTALIS ENGENHARIA (2023).

Observa-se que os custos relacionados à coleta, transporte e disposição final é deficitário em todos os municípios, exceto Cordilheira Alta que tem previsão para arrecadar valor equivalente ao efetivamente gasto para tal finalidade a partir de 2024 e que os municípios de Guatambu e São Carlos não apresentaram o valor arrecadado.

7. SELEÇÃO DE TECNOLOGIA, JUSTIFICATIVA TÉCNICA E DE CUSTOS

As opções técnicas de rotas tecnológicas, atualmente, têm consistência para se adequarem às realidades locais, de forma efetiva. Tais processos permitem cada vez mais a associação com a cadeia local de coleta seletiva e reciclagem, com extrema ênfase à

inclusão e fortalecimento dos catadores de materiais recicláveis, devidamente organizados, como prerrogativa.

Embora a cadeia de reciclagem não seja o foco do presente estudo, faz-se necessária uma abordagem no tocante ao processo, já que o material produzido pelos municípios integrantes deste estudo tem origem diversa, passando por diferentes estágios de classificação. Complementarmente às rotas tecnológicas selecionadas, existe a necessidade de realização de processos adicionais de separação do RSU pela população, como contribuição para a eficácia do resultado aqui proposto.

As tecnologias propostas levam em consideração, além das especificidades, o atendimento aos requisitos socioambientais, econômicos e operacionais.

Adicionalmente, o estudo leva em conta o desenvolvimento tecnológico relacionado à gestão do RSU, experiências já realizadas no Brasil para o equacionamento da questão que pairam sobre o tema custos de coleta e disposição de RSU, cada vez mais altos, legislação demandando dos municípios que equacionem a relação de despesas e receitas relacionadas à cadeia que abrange sua gestão e a solução que possa ser ampliada concomitantemente ao crescimento populacional, além do interesse justificado ambientalmente se que modelos compactos são mais simples de operar e trazem menos riscos, no que tange à sua operação e manutenção.

Neste enfoque, o estudo considera a perspectiva de aumento do volume de resíduos provenientes da coleta nos municípios abrangidos, bem como a inclusão de outros tipos de resíduos, como o esgoto de estação de tratamento de esgoto ou de efluentes domésticos e/ou de resíduos sólidos urbanos de outros municípios que expressem interesse em participar desta iniciativa. No entanto, é fundamental que sejam conduzidos estudos prévios para avaliar esta integração.

Na rota tecnológica da gaseificação recomenda-se que o RSU seja submetido à um processo de produção de gás que poderá ser utilizado para:

- gerar energia elétrica, por um processo convencional a partir de vapor de uma caldeira que utiliza o gás gerado; e ou
- utilizar o gás síntese gerado em processos industriais.

Alternativamente, caso não haja quantidade suficiente de RSU necessária ao processo de gaseificação, recomenda-se utilizar um sistema de biodigestores visando a produção do biogás.

Assim, cabe estabelecer as bases para definição de arranjos técnicos e comerciais com a utilização da rota tecnológica de gaseificação para inserção da utilização do RSU

de forma sustentável na geração de energia elétrica e/ou na produção de gás síntese para uso industrial.

Ao avaliar as tecnologias que facilitam a transformação do RSU em gás, quer seja por biomassa estabilizada ou por tratamento térmico, levou-se em conta a compatibilização dos respectivos processos com os requisitos ambientais, haja vista que todas as tecnologias produzem determinados resíduos.

Em tese, o percentual reduzido à cinza está entre 10% a 15% do RSU processado na rota da gaseificação, e desde que dado um tratamento adequado, tal quantitativo poderá ser inserido na cadeia produtiva, agregando mais valor ao sistema de destinação do RSU.

Dentre as tecnologias avaliadas e com desenvolvimento no Brasil, no preparo da biomassa para gaseificação destacam-se transformar o RSU pelos seguintes métodos:

- por meio de um processo aeróbio, na forma bio-estabilizada, seca e com poder calorífico adequado para gaseificação;
- por meio de uma câmara onde ocorre a oxidação parcial a baixas temperaturas para gerar calor, suficiente apenas para promover a aceleração do processo de degradação do RSU, gerando o gás.

Fundamentado nestas rotas tecnológicas de preparo de biomassa para gaseificação, buscou-se conceituar o estabelecimento de um processo de preparação de biomassa sem a vinculação de qualquer segmento industrial ou mesmo de determinado fornecedor e/ou tecnologia patenteada.

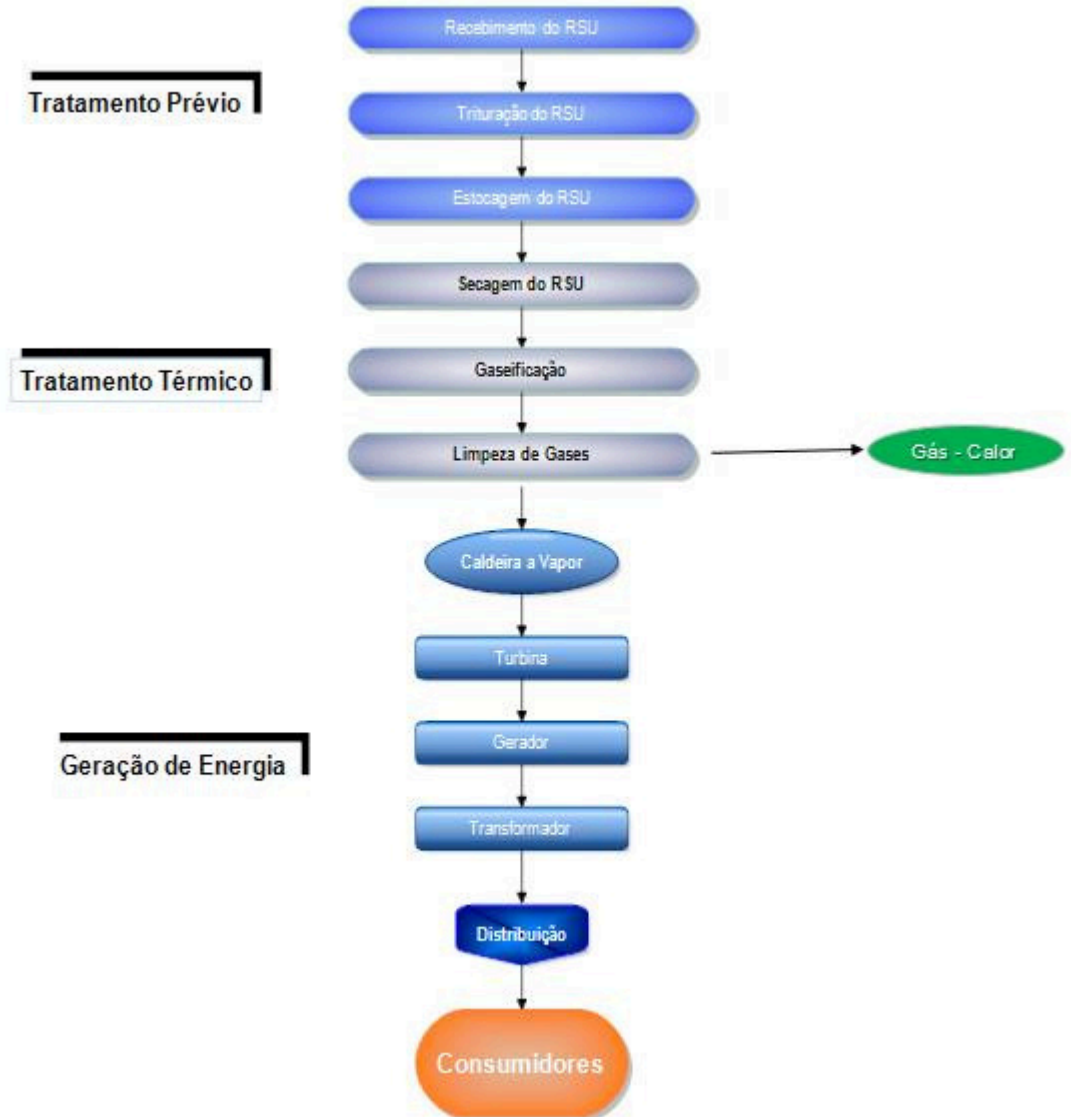
Destaca-se que algumas experiências de rota tecnológica que cogita a utilização de um combustível auxiliar para transformar p SER em “pellets” ou briquetes, aumentando o PCI do RSU disponível, além de experiências com a utilização de unidades geradoras em ciclo combinado como gás.

A hierarquia de destinação dos resíduos considera: a reciclagem, a redução, o tratamento biológico, o tratamento térmico, o co-processamento (CDR) sendo este prioritário com a rota waste-to-energy (recuperação energética) e, por último, o aterro sanitário, com a captura de metano. (Schmitke *apud* ANEEL, 2021).

7.1 CENÁRIO 1 – GASEIFICAÇÃO

A rota tecnológica é esquematizada na Figura 18 abaixo, que prevê a utilização de RSU por meio da gaseificação para a geração da energia elétrica, utilizando um sistema convencional de caldeira e turbina ou mesmo, no lugar da caldeira, um trocador de calor para ser utilizado como insumo de unidades industriais.

Figura 18. Fluxograma do processo de gaseificação



Fonte: Flow Energias Renováveis (2013).

A solução de gaseificação prevê todas as etapas necessárias à recuperação energética, desde a entrada do resíduo conforme coletado das residências (*in natura*), sem necessidade de providenciar qualquer beneficiamento ou separação preliminar, até a geração de energia elétrica ou o aproveitamento do gás em atividades industriais.

Observa-se a importância de pré-tratamento na entrada da usina para melhorar o poder calorífico do RSU, secando os orgânicos e garantindo a reciclagem para os resíduos de valor agregado.

7.1.1 Alternativa A – Gaseificação em leito fluidizado circulante

A planta de gaseificação caracteriza-se por apresentar reator de gaseificação em leito fluidizado circulante, em regime anaeróbico. A produção do gás ocorre a partir da

gaseificação de resíduos orgânicos, ou alguns inorgânicos, em cuja composição química exista cadeias carbônicas, ou seja, a grande maioria de elementos visualizados a exceção feita às substâncias minerais inertes.

O processo está sintetizado nas seguintes etapas:

- Inicialmente são removidos materiais inertes para aumento de rendimento do processo (tais como vidros e metais) e são ajustados fatores para melhor performance da tecnologia, tais como umidade e granulometria controlada;
- A segunda etapa, “Planta Termoquímica”, conta com tecnologia patenteada possibilitando o tratamento termoquímico do combustível gerado, obtendo o gás de síntese sem queima, sendo um processo limpo e controlado, livre da formação de passivos ambientais (restando a cinza inerente ao combustível as quais já possuem rotas tecnológicas para sua total absorção pelo mercado).
- Por fim, a última etapa, “Planta de Geração” configura o aproveitamento energético do gás de síntese, que pode ser usufruído para geração de calor, geração de vapor, uso como reagente químico ou geração de energia elétrica.

Observou-se que, para a elaboração do projeto básico e executivo existem particularidades pertinentes ao fornecedor que deverá realizar análise qualitativa e quantitativa dos resíduos para modular o projeto adequado à realidade do local, e deverão ser aferidos os limites mínimos e máximos de cada modelo.

7.1.2 Alternativa B – Gaseificação em grelha móvel

Este cenário considera o processo de gaseificação que se caracteriza como a oxidação parcial de um combustível, tratado em condições subestequiométricas, levando à produção de um gás de síntese e uma série de subprodutos. O gás de síntese pode ser aplicado de diferentes formas, seja para produção direta de energia ou a produção de outros combustíveis e químicos (Recari *et al.*, 2017).

Como a gaseificação pode ser adaptada para tratar uma série de materiais, e as condições do processo podem ser alteradas para isolar seletivamente diferentes produtos gasosos (Watson *et al.*, 2018), o sistema de gaseificação de resíduos sólidos urbanos (RSU) consiste em um reator de leito de grelhas móveis, que contempla combinações de diferentes condições de pressão, temperatura, velocidade e teor de agentes gaseificantes, para cada etapa de degradação térmica, oxidação enérgica subestequiométrica e reforma de gases (Lopes; Okamura; Yamamoto, 2015).

O gaseificador de grelhas móvel se mostrou apropriado para processar o RSU com diferentes características e produzir gases combustíveis derivados de resíduos (Syngás). A secagem, pirólise, gaseificação e reforma são realizadas em sub-câmaras que controlam cada uma dessas variáveis. Os gases derivados de resíduos (Syngás) apresentam características muito específicas quanto ao poder calorífico, umidade, densidade e temperatura, além de variarem conforme as características do RSU, sendo que a combustão completa do (Syngás) na câmara de combustão evita a formação de dioxinas e furanos.

No processo de gaseificação, a combustão é aperfeiçoada, ocorrendo a produção de gás combustível antecipadamente, acarretando a temperatura de operação elevada.

A gaseificação melhora as condições de combustão, pois durante o processo ocorre a produção de um gás combustível que poderá ser utilizado em posterior combustão, o que faz com que a temperatura de operação seja elevada para a faixa 1.223 K a 1.323 K, alcançando uma combustão estável e completa do gás de síntese, evitando a geração de precursores clorados. Há também maior taxa de conversão de carbono, favorecendo a combustão, evitando a produção de carbono fixo, outro precursor na formação das dioxinas e furanos (Tanigaki *et al.*, 2012).

A combustão do gás de síntese é feita depois da câmara do gaseificador, e anterior à caldeira, externamente ao sistema de troca térmica. Desta forma, um importante processo é que a câmara de gaseificação, assegura um tempo de retenção minimamente de 2 segundos em regime turbulento, oxidante e em temperaturas acima de 1.200 °C, promovendo assim a oxidação total de compostos orgânicos, que antecedem a síntese de dioxinas e furanos nos processos de resfriamento que causa efeitos nocivos ao serem lançados na atmosfera.

7.2 CENÁRIO 2 – BIODIGESTÃO

Nesta tecnologia o material orgânico é degradado em um ambiente controlado, gerando o biogás, diferentemente do aterro sanitário, neste sistema de biodigestores após uma triagem prévia do resíduo, somente a parte orgânica do resíduo é tratada. Vale lembrar que o biogás do RSU é uma fonte de energia renovável descentralizada, com utilização para diversos fins, razão pela qual pode ser utilizada de forma isolada em pequenos municípios que não detém grande quantidade do RSU.

É importante salientar que os gases produzidos geram energia num sistema convencional, inicialmente em motores geradores de ciclo Otto, uma modalidade bastante

comum quando este volume de gases não for suficiente para utilização de sistemas mais complexos de geração, como caldeiras, com potências e custos mais elevados.

Já o resíduo de uma unidade de biogás poderá ser utilizado como biofertilizante e o material não utilizado na biodigestão poderá ser transformado em CDR e outros produtos, que servirão como combustível e para outros usos. Tecnologia desenvolvida no oeste de Santa Catarina prevê a transformação deste material em produtos como tampa de bueiros, tampa de caixa de inspeção de energia elétrica, assim como outros processos recebem este material e os adiciona a matéria-prima virgem para a produção de outros produtos.

É possível afirmar que a combinação da biodigestão com a reciclagem têm disponibilizado um maior potencial energético, no entanto, devem ser compreendidas as condições locais, que são variáveis, e proporcionam diferentes formas de aproveitamento energético do RSU.

Existem digestores disponíveis comercialmente com tamanhos variando de 70 m³ a 5000 m³ de capacidade do reator, os maiores podem apresentar até 2 MW de potência, estando implantados na Europa, onde a Alemanha e Dinamarca lideram este campo tecnológico.

8. IDENTIFICAÇÃO DO MELHOR LOCAL PARA A INSTALAÇÃO DA USINA DE TRATAMENTO DO RSU

A localização da usina pode ocorrer em quaisquer um dos municípios abrangidos. A tomada de decisão caberá aos prefeitos baseados nas indicações técnicas, considerando ainda, os seguintes fatores: disponibilidade de área, da otimização logística, distanciamento de APP – Área de Preservação Permanente, proximidade do local consumidor da energia gerada.

Portanto, o presente estudo apresenta 6 diferentes cenários, considerando como hipótese a localização da usina em cada um dos municípios estudados, onde cabe que seja observado a distância de cada um dos demais municípios em relação a cada um dos cenários indicados.

Considerou-se que o transporte de resíduos sólidos para o destino seria realizado por caminhões do tipo *roll-on roll-off*, com capacidade de armazenamento de até 7 toneladas. O custo por quilômetro rodados desse transporte foi estimado em R\$ 2,00, e as distâncias foram simuladas a partir da sede de cada município. Quando o cenário levou em conta um referido município, como parâmetro hipotético foi considerado como nulo

o custo do transporte do RSU deste município para a usina. Caberá ativar o custo deste transporte para a composição dos custos após quando for definido o local da implantação da usina pelos prefeitos.

8.1 CENÁRIO 1 – USINA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE ÁGUAS DE CHAPECÓ

No Cenário 1, a localização da usina é no município de Águas de Chapecó.

Isso resulta em uma média de transporte dos resíduos de 130,2 km dos municípios abrangidos até a usina. Considerando a otimização do transporte, serão necessárias três viagens diárias para transportar o RSU dos municípios de origem até a usina, em caminhões com capacidade de transporte de 7 toneladas. O custo total estimado para o transporte do RSU até o local da usina é de R\$ 260,40, considerando três viagens. Vale ressaltar que o município-sede da usina não está incluído nos cálculos de custo conforme informado.

Na Tabela 16 a seguir estão relacionados a origem, o destino dos resíduos, a quantidade gerada por dia, a respectiva distância percorrida da cidade origem até a cidade sede da usina e o valor atribuído.

Tabela 16. Cenário considerando o a sede da usina no município de Águas de Chapecó

Origem	Destino	Ton/dia	Km	Número de viagens	Valor de transporte
Águas de Chapecó	Águas de Chapecó	3,5	0	0	R\$ -
Cordilheira Alta		1,7	57,2	1	R\$ 114,40
Planalto Alegre		0,6	14,3		R\$ 28,60
Guatambu		1,8	28,2	1	R\$ 56,40
Caxambu do Sul		1,4	27,2		R\$ 54,40
São Carlos		7	3,3	1	R\$ 6,60
Total		16	130,2	3	R\$ 260,40

Fonte: Ambientalis Engenharia (2023)

8.2 CENÁRIO 2 – USINA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE CAXAMBU DO SUL

A localização da usina para o segundo cenário é no município de Caxambu do Sul.

A média de deslocamento considerando os demais municípios foi de 127,5 km. Considerando a otimização do transporte, serão necessárias três viagens diárias para transportar o RSU dos municípios de origem até a usina, em caminhões com capacidade de transporte de 7 toneladas. O custo total estimado para o transporte foi de R\$ 255,00

considerando 3 viagens. Vale ressaltar que o município-sede da usina não está incluído nos cálculos de custo conforme informado.

Na Tabela 17 a seguir estão relacionados a origem, o destino dos resíduos, a quantidade gerada por dia, a respectiva distância percorrida da cidade origem até a cidade sede da usina e o valor atribuído.

Tabela 17. Cenário considerando a sede da usina no município de Caxambu do Sul

Origem	Destino	Ton/dia	Km	Número de viagens	Valor de transporte
Caxambu do Sul	Caxambu do Sul	1,4	0	0	R\$ -
Cordilheira Alta		1,7	45,1	1	R\$ 90,20
Planalto Alegre		0,6	13,2		R\$ 26,40
Guatambu		1,8	11,9		R\$ 23,80
Águas de Chapecó		3,5	27,2	1	R\$ 54,40
São Carlos		7	30,1	1	R\$ 60,20
Total		16	127,5	3	R\$ 255,00

Fonte: Ambientalis Engenharia (2023)

8.3 CENÁRIO 3 – USINA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE CORDILHEIRA ALTA

No terceiro cenário, a usina se localiza no município de Cordilheira Alta. Considerando os demais municípios, a média de deslocamento é de 238,8 km, sendo este o município com maior distância média dos municípios abrangidos até a usina. A otimização do transporte dos resíduos sólidos consiste em 3 viagens diárias até a usina de tratamento, com custo total estimado de R\$ 477,60 considerando as 3 viagens. Vale ressaltar que o município-sede da usina não está incluído nos cálculos de custo conforme informado.

Na Tabela 18 a seguir estão relacionados a origem, o destino dos resíduos, a quantidade gerada por dia, a respectiva distância percorrida da cidade origem até a cidade sede da usina e o valor atribuído.

Tabela 18. Cenário considerando a sede da usina no município de Cordilheira Alta

Origem	Destino	Ton/dia	Km	Número de viagens	Valor de transporte
Cordilheira Alta	Cordilheira Alta	1,7	0	0	R\$ -
Planalto Alegre		0,6	43,2	1	R\$ 86,40
Guatambu		1,8	33,2		R\$ 66,40
Caxambu do Sul		1,4	45,1		R\$ 90,20
Águas de Chapecó		3,5	57,2	1	R\$ 114,40
São Carlos		7	60,1	1	R\$ 120,20
Total		16	238,8	3	R\$ 477,60

Fonte: Ambientalis Engenharia (2023)

8.4 CENÁRIO 4 – USINA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE GUATAMBU

No Cenário 4, a localização da usina é feita no município de Guatambu. Isso resultou em uma média de deslocamento de 118,3 km para os demais municípios envolvidos. Considerando a otimização do transporte, serão necessárias três viagens diárias para transportar o RSU até a usina em caminhões com capacidade de transporte de 7 toneladas.

O custo total estimado para esse transporte foi de R\$ 236,60 por viagem realizada. Vale ressaltar que o município-sede da usina não está incluído nos cálculos de custo conforme informado.

Na Tabela 19 a seguir estão relacionados a origem, o destino dos resíduos, a quantidade gerada por dia, a respectiva distância percorrida da cidade origem até a cidade sede da usina e o valor atribuído.

Tabela 19. Cenário considerando a sede da usina no município de Guatambu

Origem	Destino	Ton/dia	Km	Número de viagens	Valor de transporte
Guatambu	Guatambu	1,8	0	0	R\$ -
Cordilheira Alta		1,7	33,2	1	R\$ 66,40
Planalto Alegre		0,6	13,9	1	R\$ 27,80
Caxambu do Sul		1,4	11,9		R\$ 23,80
Águas de Chapecó		3,5	28,2		R\$ 56,40
São Carlos		7	31,1	1	R\$ 62,20
Total		16	118,3	3	R\$ 236,60

Fonte: Ambientalis Engenharia (2023)

8.5 CENÁRIO 5 – USINA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE PLANALTO ALEGRE

A localização da usina para o quinto cenário é o município de Planalto Alegre.

A média de deslocamento para transporte do RSU entre os municípios envolvidos foi a menor entre todos os cenários, com 101,8 km. Com a otimização de transporte dos resíduos sólidos serão necessárias 3 viagens diárias para a usina de tratamento de resíduos. O custo total estimado para o transporte foi de R\$ 203,60, considerando as 3 viagens. Vale ressaltar que o município-sede da usina não está incluído nos cálculos de custo conforme informado.

Na Tabela 20 a seguir estão relacionados a origem, o destino dos resíduos, a quantidade gerada por dia, a respectiva distância percorrida da cidade origem até a cidade sede da usina e o valor atribuído.

Tabela 20. Cenário considerando a sede da usina no município de Planalto Alegre

Origem	Destino	Ton/dia	Km	Número de viagens	Valor de transporte
Planalto Alegre	Planalto Alegre	0,6	0	0	R\$ -
Cordilheira Alta		1,7	43,2	1	R\$ 86,40
Guatambu		1,8	13,9		R\$ 27,80
Caxambu do Sul		1,4	13,2	1	R\$ 26,40
Águas de Chapecó		3,5	14,3		R\$ 28,60
São Carlos		7	17,2		R\$ 34,40
Total			16	101,8	3

Fonte: Ambientalis Engenharia (2023)

8.6 CENÁRIO 6 – USINA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS

Para o 6 cenário, a localização da usina é no município de São Carlos. A média de deslocamento para transporte do RSU entre os municípios envolvidos é de 141,8 km. Com a otimização de transporte dos resíduos sólidos serão necessárias 2 viagens diárias para a usina de tratamento de resíduos, sendo este o cenário com menor necessidade de viagens para o transporte do RSU da origem até a usina, sendo o custo total estimado de R\$ 477,60, considerando as 2 viagens. Vale ressaltar que o município-sede da usina não está incluído nos cálculos de custo conforme informado.

Na Tabela 21 a seguir estão relacionados a origem, o destino dos resíduos, a quantidade gerada por dia, a respectiva distância percorrida da cidade origem até a cidade sede da usina e o valor atribuído.

Tabela 21. Cenário considerando a sede da usina no município de São Carlos

Origem	Destino	Ton/dia	Km	Número de viagens	Valor de transporte
São Carlos	São Carlos	7	0	0	R\$ -
Cordilheira Alta		1,7	60,1	1	R\$ 120,20
Guatambu		1,8	31,1		R\$ 62,20
Planalto Alegre		0,6	17,2	1	R\$ 34,40
Caxambu do Sul		1,4	30,1		R\$ 60,20
Águas de Chapecó		3,5	3,3		R\$ 6,60
Total			16	141,8	2

Fonte: Ambientalis Engenharia (2023)

A Tabela 22 a seguir apresenta o resumo do valor de transporte e do número de viagens estimadas para o transporte do RSU dos municípios origem para a sede da usina, sendo o município de Planalto Alegre o que apresenta menor custo e o município de Cordilheira Alta, o maior custo para este atributo.

Tabela 22. Resumo da distância e custo estimado em ordem crescente de custo para transporte do RSU até o local hipotético de instalação da usina

Município sede da usina	Km	Número de viagens	Valor de transporte
Planalto Alegre	101,8	3	R\$ 203,60
Guatambu	118,3	3	R\$ 236,60
Caxambu do Sul	127,5	3	R\$ 255,00
Águas de Chapecó	130,2	3	R\$ 260,40
São Carlos	141,8	2	R\$ 283,60
Cordilheira Alta	238,8	3	R\$ 477,60

Fonte: Ambientalis Engenharia (2023)

9. ASPECTO ECONÔMICO – FINANCEIRO E ESTIMATIVA DE CUSTOS

9.1 CUSTO DE TRANSPORTE E DESTINAÇÃO DO RSU

O leilão da ANEEL estimulou a geração de energia a partir de RSU com um preço teto bem acima do preço padrão de contratação dos leilões de energia até então. Mas a quantidade de energia gerada neste projeto não é suficiente para a concorrência em leilões.

A Lei n.º 12.305, de 02 de agosto de 2010, especificamente seu art. 19 e, ainda, a Lei n.º 14.026/2020 passou a tratar da solução para questão apresentada por Paulo César Domingues (ANEEL (2021) de que “55% dos municípios brasileiros não cobram pela taxa de lixo e dentre os que a cobram, o valor arrecadado não permite a recuperação plena dos custos efetuados”.

Os custos relativos ao processo relacionado a todo RSU, objeto deste estudo, abrange o seguinte detalhamento: “coleta, transbordo, transporte, triagem para fins de reutilização ou reciclagem, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos, englobando: i) resíduos domésticos; ii) resíduos originários de atividades comerciais, industriais e de serviços, em quantidade e qualidade similares às dos resíduos domésticos, que, por decisão do titular, sejam considerados resíduos sólidos urbanos, desde que não sejam de responsabilidade de seu gerador nos termos da norma legal ou administrativa, de decisão judicial ou de termo de ajustamento de conduta; e iii) resíduos originários do Serviço Público de Limpeza Urbana (SLU₁)” (CNM, 2022).

A NR 1/ANA/2021 *apud* CNM, 2022) traz o conceito de sustentabilidade econômico-financeira e afirma que: “a cobrança, arrecadação e efetiva disponibilização ao prestador de serviço, de recursos financeiros, suficientes para fazer frente aos custos eficientes de operação e de manutenção (OPEX), de investimentos prudentes e

necessários (CAPEX), bem como a remuneração adequada do capital investido para a prestação adequada do SMRSU no longo prazo”.

O não cumprimento desta lei pelos municípios é considerado renúncia de receita, sujeita a penalidades legais.

A utilização de taxa ou tarifa para o cumprimento legal está sujeita a análise dos municípios, respaldados nos dispositivos legais.

Segundo o Consórcio Iberê (2023a), “em setembro o Tribunal de Contas iniciou auditoria nos municípios para averiguar o atendimento a essas legislações². Entretanto, o TCE suspendeu as auditorias, mas irá retornar em breve”.

O valor pago atualmente para a coleta, transporte e disposição do RSU dos municípios de Águas de Chapecó, Caxambu do Sul, Cordilheira Alta, Guatambu, Planalto Alegre e São Carlos é de R\$ 2.704.433,43.

10. ASPECTOS AMBIENTAIS E SOCIAIS

Este estudo trata de uma solução para a questão de resíduos sólidos, tendo em vista que os aterros sanitários, embora tenham sido opções importantes até então, contribuindo como solução para a eliminação dos lixões, contudo, atualmente, a destinação de resíduos pode ser convertida em geração de energia limpa em detrimento de ser disposto em células nos aterros sanitários.

Existem diferentes rotas tecnológicas para a recuperação e reaproveitamento energético de RSU e este estudo trata de uma solução para o saneamento básico, no que tange à vertente de resíduos sólidos, sendo considerada uma opção para a matriz energética do país, salientando que, se fosse exclusivamente analisada a viabilidade enquanto fonte energética, existem outras mais interessantes sob o ponto de vista de menor valor de investimento para a geração de energia limpa.

Destaca-se que os aterros sanitários onde são dispostos o RSU dos municípios abrangidos por esse estudo operam com licenças ambientais, sendo que os serviços prestados de coleta, transporte e disposição final do RSU destes municípios não foram objeto deste estudo, no que tange às suas condições técnicas e socioambientais.

Segundo SCHMITKE *apud* ANEEL (2021), na Alemanha são proibidos aterros sanitários desde 2005, sendo necessário fazer a reciclagem, o tratamento biológico por

²Tribunal de Contas. <https://www.tcscsc.br/planos-municipais-de-residuos-solidos-ausencia-de-cobrancade-taxas-ou-tarifas-e-descarte-irregular>

meio da biodigestão anaeróbia com a fração orgânica separada na origem e a recuperação energética (waste-to-energy).

A vida útil dos aterros e a falta de novas áreas é um desafio que respaldaram estudos como este. O Supremo Tribunal Federal proibiu a ampliação e a criação de aterros localizados em área de preservação permanente, segundo o mesmo autor.

Este estudo deve estimular outros arranjos para a questão dos resíduos sólidos em municípios de pequeno e médio porte, tendo em vista as rotas tecnológicas mais disponíveis e acessíveis têm sido as que atendem demandas de município de grande porte, ou quando se unem em consórcios para aumentar o volume de resíduos para que o investimento seja mais atraente sob o ponto de vista econômico.

Os arranjos de menor porte e a não concentração de resíduos em grandes volumes em determinado local é ambientalmente mais adequado. Além disso, deve-se levar em conta a logística do transporte de resíduos para a concentração em determinado local, quando concentrado, o que acarreta riscos de acidentes com danos ambientais e maior volume de veículos trafegando em maiores distâncias entre a fonte geradora e a área de disposição final.

Um destaque especial deve ser dado à importância da inclusão de catadores de materiais recicláveis neste processo. Nem todos os municípios possuem catadores de materiais recicláveis devidamente organizados. Este estudo enfatiza a importância de observar que, quando houver, estes devem ser capacitados para desenvolver esta atividade com profissionalismo e devidamente organizados institucionalmente. Importante salientar, também, que as associações e cooperativas de catadores de materiais recicláveis existente na área de estudo bem como em cidades vizinhas podem ter o equilíbrio financeiro das suas atividades revisados com o estudo de viabilidade para o recolhimento dos materiais recicláveis da área abrangida por esse estudo.

11. PRÓXIMAS ETAPAS

As etapas a seguir sucedem a entrega deste estudo e são determinantes para a tomada de decisão dos prefeitos municipais.

11.1 VISITA TÉCNICA EM USINAS QUE OPERAM COM AS ROTAS TECNOLÓGICAS APRESENTADAS

Recomenda-se que seja organizada uma visita às plantas em operação das tecnologias recomendadas, podendo a empresa de consultoria Ambientalis Engenharia realizar a interface para o agendamento. A visita, com a participação de consultores da

Ambientalis Engenharia, prefeitos e seus assessores, é uma estratégia para ser observada *in loco* cada tecnologia e a sua aplicabilidade à realidade local dos municípios.

Cabe também a uma reunião remota ou presencial de apresentação do presente estudo aos prefeitos dos municípios envolvidos, para sanar quaisquer tipos de dúvidas.

Esta decisão é importante para a validação da rota a ser aprovada pelos Prefeitos, a contratação do projeto executivo e busca de financiamentos para a implantação do empreendimento.

11.2 ANÁLISE ECONÔMICO-FINANCEIRA

Este estudo prevê a elaboração de indicadores de viabilidade econômico-financeira à rota tecnológica de sistema de gaseificação, considerando as peculiaridades de cada cenário.

Os estudos fundamentam a análise de cenários visando modelagem de financiamento, proposições para isenções fiscais, estruturação para formatação de parcerias de negócio com as receitas geradas e estratégias para o fomento industrial, sendo necessário, para tal, a tomada de decisão dos Prefeitos, da rota tecnológica a ser implantada.

A partir desta definição é necessária uma orçamentação detalhada dos custos de implantação de uma unidade de geração de energia elétrica ou produção de gás um indicativo do valor e tomada de decisão do local exato da sua implantação.

A partir da definição da rota a ser implantada, poderão ser analisadas as oportunidades para o consumo de energia em iluminação de vias e prédios, uma vez que os valores da energia gerada em horários de ponta poderão viabilizar ganhos com este tipo de geração nas demandas, cabendo para isso análise das questões regulatórias.

Também cabe avaliação de arranjos para geração de energia a partir do RSU, como fonte de autoprodução, visando incluir os consumidores na estratégia de sustentabilidade do projeto advindo deste estudo, na expansão e inserção dessa fonte na matriz.

A partir de então também é possível a obtenção de indicadores sobre a égide regulatória vigente as alternativas de geração de energia, tendo como fonte o RSU, visando as modalidades de leilão (nova, reserva e fontes alternativas), autoprodução e geração em horário ponta e os aspectos atinentes à distribuição focando a geração distribuída e tarifa de distribuição, para propor, se for o caso, alterações no marco regulatório.

As receitas geradas por esta usina podem ter as seguintes procedências: recebimento dos resíduos pagos pelos municípios, chamada de *Gate Fee* para concessões e subsídios, advinda do uso/venda da eletricidade gerada, ou de entrega energia/vapor para empresas privadas, da venda de créditos de carbono, dentre outros definidos quando planejada a governança para a implantação, operação e manutenção da usina, se implantada.

A otimização dos custos de logística de transporte do RSU poderá trazer uma economia adicional nos custos praticados atualmente, tendo em vista que 65% dos custos de contratos de coleta, transporte e disposição dos resíduos advém do transporte.

11.3 IMPLANTAÇÃO DA UNIDADE GERADORA

A recomendação do presente estudo ao apresentar rotas tecnológicas de gaseificação e de biodigestão, resultantes de pesquisas realizadas nestes últimos anos, proporciona aos municípios abrangidos neste estudo, o uso destas tecnologias no equacionamento das questões relativas ao RSU, pois está baseada também em ações que a indústria já desenvolveu, testou, havendo instituições que já implantaram as tecnologias recomendadas.

Assim os incentivos já implantados nas indústrias destinadas a fornecer equipamentos para outras fontes de energias renováveis levarão os setores institucionais a alavancarem programas específicos para tal, diferentemente daqueles de grande porte que tratam de projetos como o de 20 MW, vencedor do Leilão A-5 de 2021.

No caso do presente estudo, com geração de **16 t/dia de RSU**, para se adotar a rota tecnológica de gaseificação será necessário obter maior quantidade de RSU. Nos processos de gaseificação, atualmente, a viabilidade econômica se obtém a partir da obtenção de 50 toneladas/dia de RSU, portanto, para a seleção desta rota será necessário a otimização da coleta, seja trazendo resíduos da área rural destes municípios, buscando outros tipos de resíduos orgânicos, além de resíduos de esgoto, e/ou ainda, agregar RSU de outros municípios que tenham interesse em se integrar à iniciativa.

A proposição se enquadra, para inserção desta fonte na matriz energética, por meio da geração distribuída em empreendimentos de mini-geração que está limitada a 5 MW, contudo, num momento intermediário, dada à quantidade de RSU, deve ser focado na produção de gases de síntese direcionado à indústria local ou iluminação de vias ou prédios públicos.

Já se a opção for pela tecnologia de biodigestão, poderá processar o que já existe efetivamente na área de estudo, segundo os dados coletados, sendo que o biogás produzido poderá alimentar motogeradores com potência instalada de 250 kW, os quais poderão ser serão utilizados para compensações energéticas dos municípios abrangidos ou até para na modalidade geração distribuída.

Notadamente, para ambos os casos, a aferição destes números dependerá da execução de um projeto de engenharia básica o qual deverá detalhar as bases que irão estruturar o projeto executivo da unidade geradora, considerando o que segue:

- a capacidade de processamento do RSU, especificando os requisitos mínimos de qualidade e quantidade da fonte primária e outras características principais mínimas do sistema para o seu adequado e ótimo funcionamento;
- o detalhamento do sistema captação e produção de gases, assim como da geração elétrica, especificando o conjunto motor-gerador ou turbina-gerador proposto e demais equipamentos relacionados ao funcionamento deste sistema;
- conexão necessária à rede de distribuição;
- identificar uma área para a implantação da unidade geradora.

11.4 CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO

Uma grande vantagem de unidades geradoras de energia ou de gás a partir do RSU é que dispensam sistemas de transmissão complexos em razão de estarem, na maioria dos casos, próximos aos centros de carga elétrica e das unidades fabris.

A seguir é apresentada uma avaliação dos custos dos dois cenários apresentados, quais sejam: i) Gaseificação, com alternativas a e b e ii) Biodigestão, em relação aos investimentos para implantação da usina.

11.4.1 Cenário 1 - Gaseificação alternativas A e B

a) Alternativa A - As usinas são modulares, de acordo com o quantitativo de energia gerada a partir do montante do RSU existente. Pode ainda ser utilizada em cidades com população com menor número de munícipes, sendo recomendado quando a geração de RSU está acima 100 t/dia, com geração de energia elétrica de aproximadamente 2 MW. Neste caso, o fato de os municípios integrantes deste estudo serem consorciados por meio do Consórcio Intermunicipal de Gerenciamento Ambiental Iberê, ainda que Chapecó não

esteja integrado, as conjecturas são favoráveis, devido ao arranjo institucionalizado que potencializa a viabilidade econômica de implantação da planta.

O Quadro 5, a seguir, apresenta módulos com estimativa de valor partindo de um consumo mínimo de 50 toneladas por dia de RSU até 275 toneladas por dia, segundo detentora tecnologia da CARBOGÁS (2021).

Quadro 5. Módulos com estimativa de valor

Módulo	Consumo de RSU* Ton/dia		Geração de energia (MWh)				CAPEX estimado*	Opex Estimado
			Mínimo		Máximo			
	Mínimo	Máximo	Total	Exportável	Total	Exportável		
1	50	70	1,1	0,8	1,5	1,1	R\$ 50.690.000,00	R\$ 2.301.266,14
2	100	140	2,1	1,6	3,0	2,3	R\$ 60.940.000,00	R\$3.715.702,42
3	150	210	3,2	2,4	4,5	3,4	R\$ 85.310.000,00	R\$ 4.453.728,55
4	200	275	4,2	3,2	6,1	4,5	R\$ 96.070.000,00	R\$ 5.223.372,82

*Estes valores podem sofrer alterações relativas as particularidades de cada projeto e do resíduo regional
Fonte: Carbogás (2021).

Apenas a título de referência, atualmente está sendo implantada, na modalidade parceria público privada (PPP), uma usina que irá gerar 7,5 MW utilizando cerca de 300 t/dia de RSU, com um investimento de R\$ 136,5 milhões.

Considerando uma análise econômica da viabilidade do referido empreendimento, o resultado é o que segue:

a.1) Modelagem base leilão A-5 de 2021

- Investimento: R\$ 136 milhões (*sendo R\$ 75 milhões do Sistema CDR + Gaseificação e R\$ 61 milhões o Sistema de Geração de Energia*)
- Previsão de Geração: 8,1 MW
- Consumo Próprio: 1,4 MW
- Energia Exportável: 6,7 MW
- Valor de Energia: R\$ 549/MWh (valor do leilão A-5 de 2021)

Mesmo com o valor da energia no modelo do Leilão A-5 de 2021, ainda não é suficiente para que o projeto tenha a viabilidade esperada, pois com a TIR 4,2% e de 21 anos para pagamento do CAPEX, certamente deverá ser estabelecido um valor para o recebimento do RSU para que seja melhorada a TIR do empreendimento.

A mesma quantidade de energia poderia ser gerada com 15 CGH com potência instalada de 1,0 MW que geram 0,43 MW/diários e um investimento de R\$ 15 milhões/cada, que totalizam R\$ 233 milhões.

a.2) Modelagem negociado na PPP com aporte dos municípios

- Investimento: R\$ 136 milhões (*sendo R\$ 75 milhões do Sistema CDR + Gaseificação e R\$ 61 milhões o Sistema de Geração de Energia*)
- Previsão de Geração: 8,1 MW
- Consumo Próprio: 1,4 MW
- Energia Exportável: 6,7 MW
- Valor de Energia: R\$ 245/MWh (valor negociado na PPP)

O valor da energia previsto para esta modalidade, de PPP, não indica ser suficiente para que o projeto tenha a viabilidade esperada, razão pela qual foi estabelecido um valor para o recebimento do RSU, para que se melhore a TIR do empreendimento.

b) Alternativa B - As usinas são também modulares, de acordo com o quantitativo de energia gerada a partir do montante do RSU existente.

b.1) Atualmente está sendo implantado na modalidade privada uma usina que irá gerar 3,3 MW utilizando cerca de 140 t/dia de RSU com um investimento de R\$ 70 milhões.

Assim, considerando uma análise econômica da viabilidade do referido empreendimento com base nos dados apresentados a seguir, quais sejam:

- Investimento: R\$ 70 milhões (*sendo R\$ 28 milhões do Sistema de Gaseificação e R\$ 42 milhões o Sistema de Geração de Energia*)
- Previsão de Geração: 3,0 MW
- Consumo Próprio: 0,54 MW
- Energia Exportável: 2,46 MW

Considerando o valor da energia da CELESC, o projeto apresenta os seguintes resultados:

- Modalidade GD 1 (valor da energia R\$475,90/MWh), TIR 13,83% e de 8 anos para pagamento do CAPEX;
- Modalidade GD 2 (valor da energia R\$458,50/MWh), TIR 11,97% e de 9 anos para pagamento do CAPEX.
- Para gerar a mesma quantidade de energia seriam necessárias 06 CGH com potência instalada de 1,0 MW que geram 0,43 MW/diários e um investimento de R\$ 15 milhões/cada, que totalizam R\$ 60 milhões.

b.2) Também está sendo avaliada a implantação de uma na modalidade PPP que irá gerar gás para uma atividade industrial, utilizando cerca de 140 t/dia de RSU, com um investimento de R\$ 28 milhões.

Considerando a análise econômica da viabilidade do referido empreendimento com base nos dados apresentados a seguir, segundo simulação, a produção para 140 t/dia e para 70 t0n/dia é apresentada a seguir:

Produção de 140 t/dia de RSU

- Investimento: R\$ 28 milhões
- Previsão de Vazão: 30.000 kg/h a 1.200°C com 7% de excesso de O₂
- Horas de Operação no Ano: 7446
- PCI do RSU: 3.000 kcal/kg

Produção de 70 t/dia de RSU

- Investimento: R\$ 28 milhões
- Previsão de Vazão: 15.000 kg/h a 1.200°C com 7% de excesso de O₂
- Horas de Operação no Ano: 7446
- PCI do RSU: 3.000 kcal/kg

Estes valores contemplam a entrega *turn-key*, contando com todos os equipamentos, conjuntos e periféricos das etapas da entrada do resíduo à geração da energia

11.4.2 Cenário 2 - Biodigestão

Para produção de 230 kW com uma potência instalada de 250 kW e a utilização da quantidade gerada atualmente de 16 t/dia de RSU, podendo ser ampliado conforme projeção de aumento da população, ou do volume de resíduos, o investimento é estimado na ordem de R\$ 12 milhões. A título exemplificativo, segundo EPE (2023) a geração de 230 kW é suficiente para abastecer de energia uma comunidade com 475 pessoas.

- Sistema de biodigestão: R\$ 10 milhões;
- 01 grupo gerador e conexão: R\$ 1,0 milhões;
- Demais equipamentos: R\$ 0,4 milhão;
- Obras Civis: R\$ 0,3 milhão;
- Aquisição de área: R\$ 0,3 milhão;
- Horas de Operação Anuais: 7.920.

Considerando o valor atual da energia da CELESC, a viabilidade econômica desta rota tecnológica para a implantação na área de estudo é apresentada por meio das seguintes opções:

- Modalidade GD 1 (valor da energia R\$ 475,90/MWh), com TIR de 14,59% e de 7 anos para pagamento do CAPEX.
- Modalidade GD 2 (valor da energia R\$ 458,50/MWh) com TIR de 12,80 % e de 8 anos para pagamento do CAPEX.

Também poderá ser estabelecido um valor de receita para o recebimento do RSU, promovendo a melhoria da TIR do empreendimento, se for o caso, havendo ainda a perspectiva do custo diminuir em relação à concorrência no mercado, para esta tecnologia, que apresenta franco crescimento de oferta.

Ainda, se em última instância, por quaisquer motivos, as rotas tecnológicas A ou B apresentadas não sejam implantadas, se recomenda a adoção da técnica da compostagem, sendo estas descentralizadas, uma por cada município gerador, diminuindo a quantidade de resíduo orgânico transportado para o destino conforme opção dos prefeitos dos municípios que integram este estudo.

11.5 CRONOGRAMA

O cronograma sintetizado, considerado para a execução do objeto deste estudo é apresentado no Quadro 6 a seguir.

Quadro 6. Cronograma

Atividade	Prazo
Tomada de decisão da rota tecnológica a partir do resultado deste estudo	15/12/2023
Articulação da governança para a implantação (local, financiamento, gestão e outros)	01/03/2024
Definição do arranjo e dos recursos	01/05/2024
Elaboração do projeto executivo baseado na solução da proposta tecnológica definida	01/09/2024
Contratação dos serviços de implantação, de equipamentos e licenciamento ambiental	01/11/2024
Conclusão da execução dos serviços	01/11/2025
Operação da usina	01/12/2025

Fonte: Autores (2023).

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020(on line). Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>>. Acesso em: 20 out. 2023.

AISSE, M. M., “**Aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos**”, ITAH, Curitiba, PR,1981.

ÁGUAS DE CHAPECÓ. Lei n.º 1.379, de 04/04/2003 Autoriza a prefeitura municipal de águas de Chapecó a participar do Consórcio Intermunicipal de Gerenciamento Ambiental do Consórcio IBERÊ e dá outras providências. **Águas de Chapecó: Câmara Municipal, 2003.**

ÁGUAS DE CHAPECÓ. Lei n.º 1.829, de 01/10/2013. Institui o Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos – PMGIRS do Município de águas de Chapecó e dá outras providências. **Águas de Chapecó: Câmara Municipal, 2013.**

ÁGUAS DE CHAPECÓ. Lei n.º 1.995, de 26/11/2019. Dispõe sobre a alteração de designação Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos – PMGIRS, instituído pela Lei municipal n.º 1.829, de 01 de outubro de 2013, no âmbito do município de Águas de Chapecó/SC e dá outras providências. **Águas de Chapecó: Câmara Municipal, 2019.**

ÁGUAS DE CHAPECÓ. Lei n.º 2.107, de 27/09/2022. Institui a política municipal do meio ambiente e o sistema municipal de proteção, controle, fiscalização, melhoria da qualidade e licenciamento ambiental, o conselho e o fundo municipal de desenvolvimento agropecuário e meio ambiente, e dá outras providências. **Águas de Chapecó: Câmara Municipal, 2022.**

ANDREOLI, C.V; DOMASZK, S; FERNANDES, F.; LARA, A.I. **Proposta preliminar de regulamentação para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto no Paraná**. Sanare, Curitiba, v.7, n.11, p.53-60, 1997.

ANDRIETTA, A. J. **Pneus e meio ambiente: um grande problema requer uma grande solução**. Out. 2002.

Disponível em: <<http://www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br/recipientes.htm>>. Acesso: 06 nov. 2023.

ANEEL, **I Seminário Desafios da Geração de Energia com Resíduos Sólidos Urbanos. 8 de dezembro de 2021**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=lm_m6HKaIn4>. Acesso em: 18 out. 2023.

ANEEL, Despacho n.º 1.512, de 21/06/2022. **Diário Oficial da União**, jun. 2022.

ANEEL, Portaria n.º 4.742, de 26/09/2017. **Diário Oficial da União**, set. 2017.

ANEEL, Resolução Normativa n.º 876, de 10/03/2020. Revogada. **Diário Oficial da União**, mar. 2020.

ARANDA, D.A.G.; RAMOS, A. L. D.; NOVA, G. D.; MARTINS, B. B. “Catalisadores para Tratamento de Gases Tóxicos Provenientes de Incineração de Lixo”. In: **Anais do XI Congresso Brasileiro de Catálise**, 2001, Bento Gonçalves. IBP, 2001. v. 1, p. 228-231.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil: 2022**. Grappa Marketing Editorial, dezembro; 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS (ABREN). **Novo marco do saneamento como grande propulsor da valorização energética de resíduos no Brasil**. Julho, 2020. Disponível em: <<https://abren.org.br/2020/07/08/novo-marco-do-saneamento-como-grande-propulsor-da-valorizacao-energetica-de-residuos-no-brasil-2/>> Acesso em: 13 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS (ABREN). **Plano Institucional**. Maio, 2020. Disponível em: <<https://abren.org.br/wp-content/uploads/2020/06/Plano-Institucional-ABREN-2020-mai2020.pdf>> Acesso em: 14 set. 2023.

BRABER K. 1995. Anaerobic digestion of municipal solid waste: a modern waste disposal option on the verge of breakthrough. **Biomass and Bioenergy**, V.9, n.1–5, p.365–376.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**.

BRASIL. Lei n.º 4.717, de 29/06/1965. Regula a ação popular. **Diário Oficial da União**, jun. 1965.

BRASIL. Lei n.º 6.496, de 07/12/1977. Institui a "Anotação de Responsabilidade Técnica" na prestação de serviços de engenharia, de arquitetura e agronomia; autoriza a criação, pelo Conselho Federal de Engenharia, Arquitetura e Agronomia - CONFEA, de uma Mútua de Assistência Profissional; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, dez. 1977.

BRASIL. Lei n.º 6.938, de 31/08/1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, ago. 1981.

BRASIL. Lei n.º 7.347, de 24/07/1985. Disciplina a ação civil pública de responsabilidade por danos causados ao meio ambiente, ao consumidor, a bens e direitos de valor artístico, estético, histórico, turístico e paisagístico (Vetado) e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, jul. 1985.

BRASIL. Lei n.º 8.080, de 19/09/1990. Dispõe sobre as condições para a promoção, proteção e recuperação da saúde, a organização e o funcionamento dos serviços correspondentes e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, set. 1990.

BRASIL. Lei n.º 8.666, de 21/06/1993. Regulamenta o art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, jun. 1993.

BRASIL. Lei n.º 9.605, de 12/02/1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, fev. 1998.

BRASIL. Lei n.º 9.795, de 27/04/1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, abr. 1999.

BRASIL. Lei n.º 10.848, de 15/03/2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis n.ºs 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, mar. 2004.

BRASIL. Lei n.º 11.079, de 30/12/2004. Institui normas gerais para licitação e contratação de parceria público-privada no âmbito da administração pública. **Diário Oficial da União**, dez. 2004.

BRASIL. Lei n.º 11.445, de 05/01/2007: Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico: altera as Leis n.º 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995, revoga a Lei n.º 6.528, de 11 de maio de 1978, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, jan. 2007.

BRASIL. Lei n.º 12.187, de 29/12/2009. Institui a Política Nacional sobre a mudança do clima. **Diário Oficial da União**, dez. 2009.

BRASIL. Lei n.º 12.305, de 02/08/2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, ago. 2010.

BRASIL. Lei n.º 12.862, de 17/09/2013. Altera a Lei n.º 11.445/2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, com o objetivo de incentivar a economia no consumo de água. **Diário Oficial da União**, set. 2013.

BRASIL. Lei n.º 14.026, de 15/07/2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei n.º 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei n.º 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei n.º 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei n.º 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei n.º 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei n.º 13.529, de 4 de

dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. **Diário Oficial da União**, jul. 2020.

BRASIL. Lei n.º 14.300, de 06/01/2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis n.ºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, jan. 2022.

BRASIL. Decreto n.º 67, de 04/05/1995. Aprova o texto da Convenção n. 170, da Organização Internacional do Trabalho, relativa à segurança na utilização de produtos químicos no trabalho, adotada pela 77ª reunião da Conferência Internacional do Trabalho, em Genebra, em 1990. **Diário Oficial da União**, mai. 1995.

BRASIL. Decreto n.º 7.217, de 21/06/2010. Regulamenta a Lei n.º 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, jun. 2010.

BRASIL. Decreto n.º 9.373, de 11/05/2018. Dispõe sobre a alienação, a cessão, a transferência, a destinação e a disposição final ambientalmente adequadas de bens móveis no âmbito da administração pública federal direta, autárquica e fundacional. **Diário Oficial da União**, mai. 2018.

BRASIL. Decreto n.º 9.578, de 22/11/2018. Consolida atos normativos editados pelo Poder Executivo federal que dispõem sobre o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima, de que trata a Lei n.º 12.114, de 9 de dezembro de 2009, e a Política Nacional sobre Mudança do Clima, de que trata a Lei n.º 12.187, de 29 de dezembro de 2009. **Diário Oficial da União**, nov. 2018.

BRASIL. Decreto n.º 10.117, de 19/11/2019. Dispõe sobre a qualificação de projetos para ampliação da capacidade de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos no âmbito do Programa de Parcerias de Investimentos da Presidência da República. **Diário Oficial da União**, nov. 2019.

BRASIL. Decreto n.º 10.668, de 08/04/2021. Altera o Decreto n.º 7.212, de 15 de junho de 2010, que regulamenta a cobrança, a fiscalização, a arrecadação e a administração do Imposto sobre Produtos Industrializados - IPI. **Diário Oficial da União**, abr. 2021.

BRASIL. Decreto n.º 10.936, de 12/01/2022. Regulamenta a Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, jan. 2022.

BRASIL. Decreto n.º 11.043, de 13/04/2022. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, abr. 2022.

BRASIL. Decreto n.º 11.412, de 10/02/2023. Dispõe sobre o Conselho do Programa de Parcerias de Investimentos. **Diário Oficial da União**, fev. 2023.

BRASIL. Resolução Normativa ANEEL n.º 77 de 18//08/2004. **Diário Oficial da União**, abr. 2004.

BRASIL. Resolução CONAMA n.º 499, de 06/10/2020. Dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer. **Diário Oficial da União**, out. 2020.

BRASIL. Resolução ANA n.º 79, de 14/06/2021. **Diário Oficial da União**, jun. 2021.

BRASIL. Resolução Normativa ANEEL n.º. 954 de 30/11/2021. **Diário Oficial da União**, nov. 2021.

BRASIL. Resolução Normativa ANEEL n.º. 965 de 14/12/2021. **Diário Oficial da União**, dez. 2021.

BRASIL. Resolução Normativa ANEEL n.º 1.059, de 07/02/2023 **Diário Oficial da União**, fev. 2023.

BRASIL. Portaria Interministerial n.º 274, de 30/04/2019. **Diário Oficial da União**, abr. 2019.

BRASIL. Portaria n.º 307, de 30/04/2019. Aprova o Programa Nacional Lixão Zero. **Diário Oficial da União**. abr. 2019.

BRASIL. Portaria n.º 279, de 20/09/2020. **Diário Oficial da União**, set. 2020.

BRASIL. Secretaria da Energia do estado de São Paulo. **Resíduos Sólidos**. 2014 Disponível em:
<<http://www.energia.sp.gov.br/portal.php/residuos-solidos>> Acesso em: 29 set. 2023.

BERTON, R.S. Riscos de contaminação do agroecossistema com metais pesados. In: Bettiol, W. & Camargo, O.A. (Eds.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000.

BUENO A. F. M. **Alternativas Energéticas**. Alternativas Energéticas – Uma Visão CEMIG. CEMIG. (2011). p.259-268.

CARBOGÁS. **Projeto RSU** [mensagem pessoal]. Mensagem de <luciano@carbogasenergia.com.br> em 08/01/2021.

CARBONFAIR. **UTE à Biomassa Bandeirantes**, (2023). Disponível em: <<https://www.carbonfair.com.br/projeto/ute-biomassa-bandeirantes>> Acesso em: 18 set. 2023.

CAXAMBU DO SUL. Lei n.º 970, de 17/04/2002. Autoriza o chefe do poder executivo a terceirizar a coleta de lixo urbano do município e dá outras providências. **Caxambu do Sul: Câmara Municipal**, 2002.

CAXAMBU DO SUL. Lei n.º 1.004, de 29/05/2003. Autoriza o município de Caxambu do Sul, a participar do consórcio intermunicipal de gerenciamento de ambiental e dá outras providências. **Caxambu do Sul: Câmara Municipal**, 2003.

CAXAMBU DO SUL. Lei n.º 1.263, de 17/07/2012. Estabelece a Política Municipal de Saneamento Básico e dá outras providências. **Caxambu do Sul: Câmara Municipal, 2012.**

CAXAMBU DO SUL. Lei n.º 1.348, de 06/05/2015. Aprova o Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos – PMGIRS do município de Caxambu do Sul e dá outras providências. **Caxambu do Sul: Câmara Municipal, 2015.**

CAXAMBU DO SUL. Lei n.º 1.449, de 26/12/2019. Autoriza o Município de Caxambu do Sul a integrar o Plano Intermunicipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região da Associação dos Municípios do Oeste de Santa Catarina - PIGIRS/AMOSC e dá outras providências. **Caxambu do Sul: Câmara Municipal, 2019.**

CAXAMBU DO SUL. Lei n.º 1.464, de 23/04/2021. Altera a lei 1.449/2019 e dá outras providências **Caxambu do Sul: Câmara Municipal, 2021.**

CAXAMBU DO SUL. Lei n.º 004, de 09/06/2022. Institui a Política Municipal do Meio Ambiente e o Sistema Municipal de proteção, controle, fiscalização, melhoria da qualidade e licenciamento ambiental, cria o Fundo Municipal do Meio Ambiente e dá outras providências. **Caxambu do Sul: Câmara Municipal, 2022.**

CCS Industrial. **Soluções para geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos provenientes do lixo urbano (RSU).** 2022. Disponível em: <<https://ccsindustrial.com.br/solucoes-para-geracao-de-energia-eletrica-a-partir-de-residuos-solidos-provenientes-do-lixo-urbano-rsu/>> Acesso em: 13 set. 2023.

CENTRO DE PESQUISA EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E SOCIEDADE (IPEA). **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos.** 2020. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>. Acesso em: 20 jan. 2023.

CENTRO PAULISTA DE ESTUDOS EM AGRONEGÓCIO (CPEA). Unidade de Recuperação Energética – URE Mauá – Relatório de Impacto Ambiental. 2020. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/earima/rima/RIMA_224_2019.pdf Acesso em: 14 set. 2023.

CIBIOGAS, **BiogásMap.** 2023. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiODc2NTlhOGItOTc2Ny00ZDc1LWl5MTMtYjYwZTRlYjFiOWQ3IiwidCI6ImMzOTg3ZmI3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWE4NGViNSJ9&pageName=ReportSection6ed365e9760a3c113b0d>. Acesso em: 04 set. 2023.

CICLUS AMBIENTAL. **O tratamento de resíduos sólidos,** 2023. Disponível em: <<https://ciclusambiental.com.br/servicos/>> Acesso em: 18 set. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (CNM). **Nota técnica n.º 15/2022. Orientações sobre a cobrança pelo manejo de resíduos sólidos urbanos.** Brasília, 2022.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB).
Biogás: Pesquisas e projetos no Brasil. 2006.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB).
Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Estado de São Paulo. 2012.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS (CRVR).
UVS Minas do Leão. 2023 Disponível em: < <https://crvr.com.br/area-de-atuacao/central-de-residuos-do-recreio/>> Acesso em: 19 set. 2023.

CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL DE GERENCIAMENTO AMBIENTAL (IBERÊ).
Ofício n.º 023/2023. Chapecó/SC, 16 out. 2023a.

CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL DE GERENCIAMENTO AMBIENTAL (IBERÊ).
Ofício n.º 018/2023. Chapecó/SC, 16 out. 2023b.

CORDILHEIRA ALTA. Lei n.º 583, de 03/06/2003. Autoriza o município de Cordilheira Alta a participar do Consórcio Intermunicipal de Gerenciamento Ambiental e dá outras providências. **Cordilheira Alta: Câmara Municipal,** 2003.

CORDILHEIRA ALTA. Lei n.º 1.001, de 26/12/2012. Estabelece a Política Municipal de Saneamento Básico e dá outras providências. **Cordilheira Alta: Câmara Municipal,** 2012.

CORDILHEIRA ALTA. Lei complementar n.º 106, de 14/05/2014. Institui o Plano Diretor municipal de Cordilheira Alta/SC. **Cordilheira Alta: Câmara Municipal,** 2014.

CORDILHEIRA ALTA. Lei n.º 1.298, de 03/12/2019. Aprova o plano intermunicipal de gestão integrada de resíduos sólidos – PIGIRS, e dá outras providências. **Cordilheira Alta: Câmara Municipal,** 2019.

CSBIO ENERGIA. **A Usina.** 2023. Disponível em: < <http://csbioenergia.com.br/bioenergia/#usina>> Acesso em: 19 set. 2023.

DE NOGUEIRA YCT (2015) **Viabilidade Técnica e Econômica de Usinas “Waste-to-Energy”.** Tese. Universidade de Brasília. Brasil. 85 pp.

DE OLIVEIRA, L. M. F. **Geração de energia através da biomassa dos resíduos sólidos urbanos:** Um caminho para o desenvolvimento sustentável?. Dissertação. Fundação João Pinheiro. Belo Horizonte, 2019.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources:** an introduction. Wiley-VCH, 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Nota Técnica DEA 18/14. **Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos.** Rio de Janeiro. Outubro de 2014. 50 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande-MS.** Nota Técnica DEN 06/08. 2008.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio.** Nota Técnica n.º EPE-DEA-NT-003/2021. Fevereiro, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023 - Ano base 2022.** Rio de Janeiro, 2023.

FERREIRA, C. R. N. **Projeto de linha industrial para o processamento de resíduos sólidos urbanos e produção de combustível derivado para a gaseificação em reator termoquímico:** Análise experimental do syngas para a produção de energia térmica e elétrica. Tese. Universidade Federal de Uberlândia. 2021. 153p.

FLOW ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Projeto de Redução de Resíduo Sólido Industrial, Gaseificação e Geração de Energia.** Proposta técnica e comercial. Florianópolis, 2013.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (FEAM). **Análise de pré- viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de um sistema de aproveitamento energético de biogás em um aterro sanitário existente no estado de Minas Gerais.** Relatório 1. Belo Horizonte: FEAM, 2009.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (FEAM). **Potencial de energias renováveis-biomassa, resíduos e hidroeletricidade.** Belo Horizonte: FEAM. v. 2. 2014.

FÓRUM BRASILEIRO DE BIOGÁS E METANO. Categoria Melhor Planta/Unidade Geradora de Biogás. CS Bioenergia S.A. Foz do Iguaçu. Abril, 2023. Disponível em: < <https://biogasebiometano.com.br/premio-melhores-do-biogas-plantas-saneamento-csbioenergia/> >. Acesso em: 18 set. 2023.

GUADAGNIN, Mário Ricardo *et al.* **Estudo de composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos em municípios do sul catarinense.** In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL. 9., 2014. Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: ABES, 2014.

GUATAMBU. Lei nº 232, de 28/07/1995. Cria o programa municipal de conservação do solo, meio ambiente e mananciais. **Guatambu: Câmara Municipal, 1995.**

GUATAMBU. Lei nº 420, de 02/12/1999. Dispõe sobre a criação do Conselho Municipal do Meio Ambiente – CODEMA, e dá outras providências. **Guatambu: Câmara Municipal, 1999.**

GUATAMBU. Lei nº 530, de 23/06/2003. Autoriza a participação do município no Consórcio Intermunicipal de Gerenciamento Ambiental, e dá outras providências. **Guatambu: Câmara Municipal, 2003.**

GUATAMBU. Lei n.º 957, de 25/10/2013. Dispõe sobre as normas que regulam as edificações no município de Guatambu e dá outras providências. **Guatambu: Câmara Municipal**, 2013.

GUATAMBU. Lei n.º 76, de 18/12/2013. Institui o código sanitário do município de Guatambu e dá outras providências. **Guatambu: Câmara Municipal**, 2013.

GUATAMBU. Lei complementar n.º 145, de 24/03/2022. Institui a Política Municipal do Meio Ambiente e o sistema municipal de proteção, controle fiscalização, melhora da qualidade e licenciamento ambiental, cria o fundo municipal do meio ambiente e dá outras providências. **Guatambu: Câmara Municipal**, 2022.

GUATAMBU. Lei n.º 1133, de 13/12/2019. Autoriza o município de Guatambu a integrar o Plano Intermunicipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Consórcio IBERÊ – PIGIRS, e dá outras providências. **Guatambu: Câmara Municipal**, 2019.

GUATAMBU. Lei complementar n.º 150, de 11/04/2022. Dispõe sobre o código de postura e meio ambiente do município de Guatambu e dá outras providências. **Guatambu: Câmara Municipal**, 2022.

HENRIQUES, R.M. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: uma Abordagem Tecnológica**. COPPE/UFRJ. 2004.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente**. 3. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

IBERDROLA. **O hidrogênio verde: uma alternativa para reduzir as emissões e cuidar do nosso planeta**. 2023. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/hidrogenio-verde>>. Acesso em: 16 out. 2023.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Brasileiro de 2000. **Rio de Janeiro: IBGE**, 2010.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Brasileiro de 2010. **Rio de Janeiro: IBGE**, 2010.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Brasileiro de 2022. **Rio de Janeiro: IBGE**, 2010.

IEA – “APPENDIX K WASTE INCINERATION” **Renewables in Power Generation: Towards a Better Environment** - 1997

INSTITUTO DE MEIO AMBIENTE DE MATO GROSSO DO SUL (IMASUL). **Usina instalada na Ceesa de MS dá destinação adequada a 100% de seus resíduos**. Campo Grande, 2019. Disponível em: <<https://www.imasul.ms.gov.br/usina-instalada-na-ceesa-de-ms-da-destinacao-adequada-a-100-de-seus-residuos/>>. Acesso em: 18 set. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA), **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos**. 2020. Disponível em:

<<https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>>. Acesso em: 11 Set. 2023.

IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. **Waste Model**. 2006.

IVIG/COPPE [Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais da Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia da UFRJ]. **Rotas Tecnológicas para aproveitamento energético dos RSU**. 237 p. 2005.

KIEHL, J. E. **Fertilizantes Orgânicos**. 1 ed. Piracicaba: Agronômica Ceres Ltda, 1985, 492p.

KIEHL, J. E. **Manual de Compostagem: maturação e qualidade do composto**. 3. ed. Piracicaba, 2002.

KISER, J. V. L. Recycling and Waste-to-Energy: The ongoing compatibility success story. **Integrated Waste Services Association (IWSA)**, 2003.

KREITH, F.; TCHOBANOGLOUS, G. Handbook of Solid Waste Management. London: MCGraw-Hill, 2002.

LAMBAIS & SOUZA. In: **Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto**: EMBRAPA Meio ambiente. Impacto de biosólidos nas comunidades microbianas dos solos, p.269-279. 2000.

LIMA, J. S., MENK, J. R. F., LICHTIG, J., OLIVEIRA, E. **Influência do Composto Orgânico no Teor de Metais Pesados de Solos Agrícolas**. Bio Engenharia Sanitária e Ambiental, ano IV, n. 3, p. 56-60. 1995.

LOPES, E. J.; OKAMURA, L. A.; YAMAMOTO, C. I. formation of dioxins and furans during municipal solid waste gasification. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 32, n. 1, p. 87-97, 2015.

MENEZES, R. A. A., GERLACH, J. L., e MENEZES, M.A. **Estágio Atual da Incineração no Brasil**. ABLP - Associação Brasileira de Limpeza Pública VII - Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública. 2000.

MINISTÉRIO FEDERAL DO MEIO AMBIENTE, PROTEÇÃO DA NATUREZA E SEGURANÇA NUCLEAR DA ALEMANHA (BMU). **Gestão de Resíduos na Alemanha**. 2023. Disponível em: <<https://www.bmu.de/en/topics/waste-resources/waste-management-in-germany/>>. Acesso: 28 fev. 2023.

NASCIMENTO, M. C. B., FREIRE, E. P., DANTAS, F. A. S., GIANSANTE, M. B. **Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil**. Artigo técnico. Eng Sanit Ambient v.24 n.1. p. 143-155, 2019.

OJOLO, S. J.; BAMGBOYE, A. I.; AIYEDUN, P. O.; OGUNYEMI, A. P. Pyrolysis of shredded plastic waste. In: **Proceedings of the 7th Africa-America International**

conference on manufacturing Technology, Port-Harcourt, Nigeria, v. 1, p. 412 – 518, 2004.

OLIVO, Valdir Eduardo. Gestão integrada sustentável de resíduos sólidos urbanos para municípios de médio porte. Tese de Doutorado. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo - RS, Brasil. 2021.

PEREIRA NETO, J. T. **Conceitos Modernos de Compostagem**. Engenharia Sanitária, v.28, n.3, p 104-109. 1989.

PLANALTO ALEGRE. Lei nº 187/1999. Cria o Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente – CODEMA, e dá outras providências. **Planalto Alegre: Câmara Municipal**, 1999.

PLANALTO ALEGRE. Lei nº 317, de 31/03/2003. Autoriza o município de Planalto Alegre a participar do Consórcio Intermunicipal de Gerenciamento Ambiental e dá outras providências. **Planalto Alegre: Câmara Municipal**, 2003.

PLANALTO ALEGRE. Lei complementar nº 23, de 16/12/2010. Dispõe sobre normas relativas ao plano diretor do município de Planalto Alegre/SC – Lei do plano diretor – e dá outras providências. **Planalto Alegre: Câmara Municipal**, 2010.

PLANALTO ALEGRE. Lei complementar nº 25, de 16/12/2010. Dispõe sobre normas relativas à utilização do espaço e o bem estar público do município de Planalto Alegre – Código de Posturas – e dá outras providências. **Planalto Alegre: Câmara Municipal**, 2010.

PLANALTO ALEGRE. Lei complementar nº 26, de 16/12/2010. Dispõe sobre normas relativas ao parcelamento do solo urbano do município de Planalto Alegre/SC e dá outras providências. **Planalto Alegre: Câmara Municipal**, 2010.

PLANALTO ALEGRE. Lei nº 630, de 18/11/2011. Dispõe sobre a regulamentação do uso de embalagens nos estabelecimentos comerciais do município e dá outras providências **Planalto Alegre: Câmara Municipal**, 2011.

PLANALTO ALEGRE. Lei nº 662/2012. Estabelece a política municipal de saneamento básico do município de Planalto Alegre e outras providências. **Planalto Alegre: Câmara Municipal**, 2012.

PLANALTO ALEGRE. Lei complementar nº 53, de 29/05/2014. Institui o código sanitário do município de Planalto Alegre e dá outras providências. **Planalto Alegre: Câmara Municipal**, 2014.

PLANALTO ALEGRE. Lei nº 65, de 30/05/2017. Dispõe sobre alterações do código tributário municipal e dá outras providências. **Planalto Alegre: Câmara Municipal**, 2017.

PLANALTO ALEGRE. Lei nº 848, de 26/05/2020. Inclui o novo Plano Interestadual de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos na Lei n.º 748/2015. **Planalto Alegre: Câmara Municipal**, 2020.

PLANALTO ALEGRE. Lei complementar n° 90, de 02/06/2021. Altera a lei complementar n° 23 e dá outras providências. **Planalto Alegre: Câmara Municipal, 2021.**

PLANALTO ALEGRE. Lei n° 898, de 05/05/2022. Institui o programa municipal de reciclagem de óleos de cozinha de origem vegetal e animal de uso culinário, através de ecopontos de recolhimento e dá outras providências. **Planalto Alegre: Câmara Municipal, 2022.**

PLANALTO ALEGRE. Lei n° 913, de 08/11/2022. Dispõe sobre a criação da semana municipal de incentivo a preservação do meio ambiente no município de Planalto Alegre/SC e dá outras providências. **Planalto Alegre: Câmara Municipal, 2022.**

POLETTI FILHO, J. A. **Viabilidade energética e econômica da incineração de resíduo sólido urbano considerando a segregação para reciclagem.** 2008. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de engenharia do campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

POLI, D. C. R. *et al.* Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos. **Waste Management.** v. 8, n. 8, p. 09-31, 2013.

PGA AMBIENTAL. Usina termelétrica à biogás. Disponível em: <<https://pgambiental.com.br/usina-termoeletrica-a-biogas/>> Acesso em: 18 out. 2023

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. **Central de tratamento de resíduos sólidos.** 2019. Disponível em: <<https://prefeitura.pbh.gov.br/slu/informacoes/coleta-seletiva/central-de-tratamento>>. Acesso em: 12 set. 2023.

PREFEITURA DE NOVA IGUAÇU. **Nova Iguaçu inaugura usina de produção de energia do lixo.** 2019. Disponível em: <<https://www.novaiгуacu.rj.gov.br/2019/08/22/nova-iguacu-inaugura-usina-de-producao-de-energia-do-lixo-3/>>. Acesso em: 18 set. 2023.

QASIM, S. R. **Wastewater treatment plants: planning, design and operation.** New York: Rinehart and Winston, 1985.

QUEZADO, L.H.N. **Avaliação de Tecnologias para Aproveitamento Energético Dos Resíduos Sólidos Urbanos.** Dissertação. 2010.

RAND, T., HAUKOHL, J. e MARXEN, U. **Municipal Solid Waste Incineration – A Decision Maker’s Guide.** Washington: IBRD, 2000.

RECARI, J. *et al.* Torrefaction of a solid recovered fuel (SRF) to improve the fuel properties for gasification processes. **Applied Energy,** v. 203, p. 177–188, 2017.

SANTA CATARINA. [Constituição (1989)]. Constituição do Estado de Santa Catarina. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina,** 1989.

SANTA CATARINA. Lei n.º 13.517, de 04/10/2005. Dispõe sobre a Política Estadual de Saneamento e estabelece outras providências. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2005.**

SANTA CATARINA. Lei n.º 13.557, de 17/11/2005. Estabelece a Política Estadual de Resíduos Sólidos. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2005.**

SANTA CATARINA. Lei n.º 14.364, de 25/01/2008. Altera o inciso VII do art. 5º da Lei n.º 13.557, de 2005, que dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2008.**

SANTA CATARINA. Lei n.º 14.675, de 13/04/2009. Institui o Código Estadual do Meio Ambiente e estabelece outras providências. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2009.**

SANTA CATARINA. Lei n.º 15.112, de 19/01/2010. Dispõe sobre a proibição do despejo de resíduos sólidos reaproveitáveis e recicláveis em lixões e aterros sanitários. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2010.**

SANTA CATARINA. Lei n.º 15.133, de 19/01/2010. Institui a Política Estadual de Serviços Ambientais e regulamenta o Programa Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais no Estado de Santa Catarina, instituído pela Lei n.º 14.675, de 2009, e estabelece outras providências. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2010.**

SANTA CATARINA. Lei n.º 15.251, de 03/08/2010. Veda o ingresso, no estado de Santa Catarina, de resíduos sólidos com características radioativas e de resíduos orgânicos oriundos de frigoríficos e abatedouros, que apresentem riscos sanitários, tais como a disseminação de febre aftosa ou outras zoonoses. Obrigatoriedade de Manifesto de Transporte de Resíduos – MTR. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2010.**

SANTA CATARINA. Lei n.º 15.442, de 17/01/2011. Altera a ementa e os arts. 1º, 2º, 3º e 4º da lei n.º 15.251, de 2010. Obrigatoriedade de Manifesto de Transporte de Resíduos – MTR e Certificado de Destinação Final – CDF. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2011.**

SANTA CATARINA. Decreto n.º 14.250, de 05/06/1981. Regulamenta os dispositivos da Lei n.º 5.793, referentes à proteção e a melhoria da qualidade ambiental. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 1981.**

SANTA CATARINA. Decreto n.º 3.272, de 19/05/2010. Fixa os critérios sobre os quais devem ser elaborados os planos de gerenciamento de resíduos sólidos referentes a resíduos sólidos urbanos municipais, previstos nos Arts. 265 e 266 da Lei n.º 14.675/2009. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2010.**

SANTA CATARINA. Instrução Normativa n.º 02, de 10/02/2020. Disposição final de resíduos sólidos urbanos em Aterros Sanitários. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2020.**

SANTA CATARINA. Instrução Normativa n.º 09, de 21/03/2012. Incineradores. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2012.**

SANTA CATARINA. Instrução Normativa n.º 34, de 10/02/2009. Atividades sujeitas ao cadastro ambiental. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2009.**

SANTA CATARINA. Instrução Normativa n.º 61, de 27/06/2018. Disposição final de rejeitos, classe I e IIA, oriundos de outros Estados, em aterros e por incineração sem aproveitamento energético. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2018.**

SANTA CATARINA. Instrução Normativa n.º 64, de 09/06/2016. Reconhecimento de Laboratórios. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2016.**

SANTA CATARINA. Instrução Normativa n.º 65, de 10/02/2013. Atividades Diversas. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2016.**

SANTA CATARINA. Instrução Normativa n.º 76, de 01/11/2018. Utilização de resíduos classe I, IIA e IIB como insumos em processos industriais ou construtivos. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2018.**

SANTA CATARINA. Instrução Normativa n.º 77, de 13/06/2018. Transporte de produtos perigosos, transporte de resíduos de saúde, transporte de resíduos ou rejeitos industriais, do comércio e de serviços, Classes I, IIA e IIB. **Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 2018.**

SÃO CARLOS. Lei n.º 27, de 20/06/1985. Cria o conselho municipal de defesa do meio ambiente. **São Carlos: Câmara Municipal, 1985.**

SÃO CARLOS. Lei n.º 637, de 14/08/1997. Dispõe sobre um auxílio para a construção de depósitos de lixo tóxico e dá outras providências. **São Carlos: Câmara Municipal, 1997.**

SÃO CARLOS. Lei n.º 710, de 28/04/1998. Dispõe sobre atos de limpeza pública e dá outras providências. **São Carlos: Câmara Municipal, 1998.**

SÃO CARLOS. Lei n.º 1116, de 13/11/2002. Autoriza o município de São Carlos a participar do Consórcio Intermunicipal de Gerenciamento Ambiental e dá outras providências. **São Carlos: Câmara Municipal, 2008.**

SÃO CARLOS. Lei n.º 1360, de 22/05/2006. Dispõe sobre a política municipal de saneamento ambiental, cria o conselho municipal de saneamento ambiental e o fundo municipal de saneamento ambiental e dá outras providências. **São Carlos: Câmara Municipal, 2006.**

SÃO CARLOS. Lei n.º 1546, de 19/12/2008. Cria o Plano Diretor Participativo de São Carlos, e dá outras providências. **São Carlos: Câmara Municipal, 2008.**

SÃO CARLOS. Lei nº 1706, de 10/12/2012. Cria o conselho municipal de agropecuária e meio ambiente do município de São Carlos e dá outras providências. **São Carlos: Câmara Municipal**, 2012.

SÃO CARLOS. Lei nº 1.862, de 30/10/2019. Institui o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMGIRS. **São Carlos: Câmara Municipal**, 2019.

SÃO CARLOS. Lei complementar nº 03, de 18/05/2022. Institui a Política Municipal de Meio Ambiente e o Sistema Municipal de proteção, controle, fiscalização, melhoria de qualidade e licenciamento ambiental, e cria o Fundo Municipal de Meio Ambiente, e dá outras providências. **São Carlos: Câmara Municipal**, 2022.

SÃO CARLOS. Lei n.º 1.950, de 15/07/2022. Proíbe jogar lixo nas vias públicas do Município de São Carlos, estado de Santa Catarina, e dá outras providências. **São Carlos: Câmara Municipal**, 2022.

SASSE, J., **A Deposição de Lixo na Alemanha**: alternativas para um programa brasileiro de administração do lixo. In: ER Ambiental, p. 49-58. 2001.

SEBRAE, **Caderno de Desenvolvimento de Santa Catarina – Águas de Chapecó**, 2019. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/municipios/sc/m/Aguas%20de%20Chapeco%20-%20Cadernos%20de%20Desenvolvimento.pdf> >. Acesso em: 25 set. 2023.

SEBRAE, **Caderno de Desenvolvimento de Santa Catarina – Caxambu do Sul**, 2019. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/municipios/sc/m/Caxambu%20do%20Sul%20Cadernos%20de%20Desenvolvimento.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2023.

SEBRAE, **Caderno de Desenvolvimento de Santa Catarina – Cordilheira Alta**, 2019. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/municipios/sc/m/Cordilheira%20Alta%20-%20Cadernos%20de%20Desenvolvimento.pdf> > Acesso em: 25 set. 2023.

SEBRAE, **Caderno de Desenvolvimento de Santa Catarina – Guatambu**, 2019. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/municipios/sc/m/Guatambu%20Cadernos%20de%20Desenvolvimento.pdf> >. Acesso em: 25 set. 2023.

SEBRAE, **Caderno de Desenvolvimento de Santa Catarina – Planalto Alegre**, 2019. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/municipios/sc/m/Planalto%20Alegre%20-%20Cadernos%20de%20Desenvolvimento.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2023.

SEBRAE, **Caderno de Desenvolvimento de Santa Catarina – São Carlos**, 2019. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/municipios/sc/m/Sao%20Carlos%20-%20Cadernos%20de%20Desenvolvimento.pdf>> . Acesso em: 25 set. 2023.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE, DESENVOLVIMENTO, CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (SEMADESC). **Governo inaugura Usina de Tratamento de Resíduos gerados na Ceasa de Campo Grande**. Campo grande, 2019. Disponível em: <https://www.semadesc.ms.gov.br/governo-inaugura-usina-de-tratamento-de-residuos-gerados-na-ceasa-de-campo-grande/>>. Acesso em: 18 set. 2023.

SILVA, L.W., **Avaliação Experimental da Transferência de Calor em Evaporadores Roll-Bond**, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, Brasil, 1998. p183.

SIQUEIRA, F. G. **Efeito do Teor de Nitrogênio Inoculantes e Métodos de Compostagem para Cultivo de Agaricus blazei**. Dissertação de Mestrado, UFLA, Lavras, MG, Brasil, 2006

SOARES, E. L. S.F. **Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro. UFRJ/COPPE (2011). 133p

SOCCOL & PAULINO. Riscos de contaminação de agrossistema com parasitos pelo uso de lodo de esgoto. In: **Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto: EMBRAPA Meio ambiente**. p. 245-258. 2000.

SOUZA, R. M; SERRA, J. C.V; JUNIOR, J. C. Z; SANTOS, D. R. R. 2011. Análise do Potencial Energético do Biogás Proveniente do Aterro Sanitário de Palmas/TO para Geração de Energia Elétrica. Revista AJES. 2011.

TANIGAKI, N.; MANAKO, K.; OSADA, M. Co-gasification of municipal solid waste and material recovery in a large-scale gasification and melting system. **Waste Management**, v. 32, n. 4, p. 667-675, 2012. ISSN 0956-053X.

THEMELIS, N. J., **An overview of the global waste-to-energy industry Waste Manag. World** (July-Aug): 40-47, 2003.

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

URE BARUERI. Energia renovável a partir dos resíduos. 2023. Disponível em: <<https://urebarueri.com.br/>>. Acesso em: 15 set. 2023.

VERMA, S. Anaerobic Digestion of biodegradable Organics in Municipal solid Wastes. Department of Earth & Environmental Engineering, Columbia University. 2002.

WATSON, J. *et al.* Gasification of biowaste : A critical review and outlooks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 83, n. March, p. 1–17, 2018.

WORLD BIOENERGY ASSOCIATION (WBA). **Waste-to-energy in Sweden**. 2023. Disponível em: <https://worldbioenergy.org/member/sweden/>. Acesso: 28 fev. 2023.



Ambientalis
Engenharia

