



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

Gustavo Henrique Araújo dos Santos

**Metodologia de previsão de potência elétrica de grupos geradores para aproveitamento  
do metano gerado em aterro sanitário de região com sazonalidade**

Araranguá

2021

Gustavo Henrique Araújo dos Santos

**Metodologia de previsão de potência elétrica de grupos geradores para aproveitamento do metano gerado em aterro sanitário de região com sazonalidade**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade do Campus Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.  
Orientador: Prof. Reginaldo Geremias, Dr.  
Coorientadora: Profa. Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dra.

Araranguá

2021

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

Santos, Gustavo Henrique Araújo dos

Metodologia de previsão de potência elétrica de grupos geradores para aproveitamento do metano gerado em aterro sanitário de região com sazonalidade / Gustavo Henrique Araújo dos Santos; orientador, Reginaldo Geremias, coorientadora, Kátia Cilene Rodrigues Madruga, 2021.

147 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade, Araranguá, 2021.

Inclui referências.

1. Energia e Sustentabilidade. 2. Resíduos Sólidos Urbanos. 3. Gás de Aterro. 4. Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal. 5. Xangri-Lá/RS. I. Geremias, Reginaldo. II. Madruga, Kátia Cilene Rodrigues. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade. IV. Título.

Gustavo Henrique Araújo dos Santos

**Metodologia de previsão de potência elétrica de grupos geradores para aproveitamento do metano gerado em aterro sanitário de região com sazonalidade**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Reginaldo Geremias, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Jeane Estela Ayres de Lima, Dra.  
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Profa. Elaine Virmond, Dra.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. César Cataldo Scharlau, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

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

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Reginaldo Geremias, Dr.  
Orientador

---

Profa. Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dra.  
Coorientadora

Araranguá, 2021.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço às minhas mães, Maria José e Ana Divina pelos ensinamentos e preparo para a vida.

Às minhas filhas Amanda Sophia e Yasmin Mayumi, por me impulsionarem na direção de uma melhora contínua.

À minha companheira Grazielle Rosa, que com seu amor, paciência e dedicação, propiciaram todo o suporte necessário para concretude desse trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Reginaldo Geremias e coorientadora Prof.<sup>a</sup> Dra. Kátia Madruga, pela sabedoria, paciência e atenção. Por exercerem seus papéis de professores com maestria e generosidade.

Aos meus professores e colegas de sala pelos conhecimentos adquiridos e experiências compartilhadas.

À Prefeitura de Xangri-Lá/RS, por colaborar no fornecimento das informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao programa de Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal de Santa Catarina e pelo privilégio de estudar em uma das melhores universidades do país.

Muitos pensam que a pesquisa científica é uma atividade puramente racional, na qual o objetivismo lógico é o único mecanismo capaz de gerar conhecimento. A ciência vai muito além da sua mera prática. Por trás das fórmulas complicadas, das tabelas de dados experimentais e da linguagem técnica, encontra-se uma pessoa tentando transcender as barreiras imediatas da vida diária, guiada por um insaciável desejo de adquirir um nível mais profundo de conhecimento e de realização própria (GLEISER, 2006).

## RESUMO

O metano (CH<sub>4</sub>) de aterro sanitário representa uma importante fonte de energia renovável. Seu aproveitamento tem sido objeto de estudo em diversos trabalhos que estimam as potências disponíveis de grupos geradores a partir da geração de CH<sub>4</sub> com periodicidade anual de tempo. Entretanto, esse tipo de análise não produz resultados satisfatórios ao ser aplicada a aterros de regiões com sazonalidade no recebimento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) ao longo dos meses do ano. A presente pesquisa teve como objetivo geral propor um método de previsão de potência elétrica instalada de grupos geradores na conversão térmica de CH<sub>4</sub> de aterro sanitário localizado em região com expressiva sazonalidade no recebimento de RSU, bem como avaliar os aspectos ambientais e econômicos decorrentes. A metodologia de previsão de potência proposta foi estudada mediante a consideração de diferentes cenários de motorização, nos quais foram analisados, de forma comparativa, com metodologia amplamente utilizada na literatura. Os estudos foram aplicados no contexto dos RSU do município de Xangri-Lá/RS. Para tanto, realizou-se a análise gravimétrica e a quantificação dos resíduos, a estimativa de vazões anuais e mensais de CH<sub>4</sub> para o período de 2022 até 2062. Foi estimada a potência disponível do aterro e potências instaladas para cada cenário de motorização e estimativa das emissões evitadas de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2eq</sub>). Ademais, foi analisada a viabilidade econômica e financeira dos cenários considerados. Os resultados da análise gravimétrica demonstraram que a fração majoritária dos RSU (76,70% em massa) é constituída por matéria orgânica. Observou-se que a quantidade de RSU gerado na alta temporada de turismo de litoral (janeiro, fevereiro e dezembro) é cerca de três vezes maior em comparação com a baixa temporada (março a novembro). As previsões de geração de CH<sub>4</sub> apresentaram máxima de 12.835,26 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> em 2042, correspondendo à potência elétrica máxima disponível de 3.579,06 kW. O cenário mais vantajoso nos aspectos ambientais e econômicos foi para o de três conjuntos de geradores, dimensionados com a metodologia proposta, inseridos de forma escalonada ao longo do tempo de exploração de 2024 até 2042. As potências instaladas dos grupos geradores foram, respectivamente, 600 kW, 800 kW e 1.400 kW. A operação em máxima capacidade durante todo o período gerou 258,60 GWh, correspondendo a 68 % de aproveitamento do potencial disponível no aterro. As emissões evitadas de CO<sub>2eq</sub> foram estimadas em 1,63 milhões de toneladas. Os indicadores econômicos e financeiros foram de US\$1.601.169,50 para o Valor Presente Líquido (VPL), 15,64% para a Taxa Interna de Retorno (TIR) e 14 anos de *Payback*. Foi verificada a viabilidade econômica e financeira em dois dos seis cenários avaliados com o uso da metodologia sugerida nesta investigação. Concluiu-se que a aplicação da metodologia proposta na presente pesquisa fornece resultados satisfatórios para regiões com sazonalidade na geração de CH<sub>4</sub>. Tais resultados sinalizam aos gestores públicos uma grande oportunidade de geração de receita com o aproveitamento energético do CH<sub>4</sub> de aterro sanitário, o que contribui para a utilização de fontes energéticas alternativas e amenização dos problemas ambientais associados aos resíduos de aterros.

**Palavras-chave:** Resíduos Sólidos Urbanos. Gás de aterro. Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal. Xangri-Lá/RS.

## ABSTRACT

The methane (CH<sub>4</sub>) from landfills represents an important source of renewable energy. Its use has been the object of study in several studies that estimate the available power of generator sets from the generation of CH<sub>4</sub> with annual periodicity of time. However, this type of analysis does not produce satisfactory results when applied to landfills in regions with seasonality in the reception of Municipal Solid Waste (MSW) throughout the months of the year. The general objective of the present research was to propose a method for predicting the installed electric power of generator sets in the thermal conversion of CH<sub>4</sub> of a landfill located in a region with significant seasonality in the reception of MSW, as well as to evaluate the environmental and economic aspects resulting from it. The proposed power forecasting methodology was studied by considering different motorization scenarios, which were analyzed in comparison with the methodology widely used in the literature. The studies were applied to the context of the MSW of the city of Xangri-Lá/RS. To this end, a gravimetric analysis and quantification of MSW was performed, and the annual and monthly CH<sub>4</sub> flows were estimated for the period from 2022 to 2062. The available power of the landfill and installed power for each motorization scenario were estimated, as well as the avoided emissions of carbon dioxide equivalent (CO<sub>2eq</sub>). In addition, the economic and financial viability of the scenarios considered was analyzed. The results of the gravimetric analysis demonstrated that the majority fraction of MSW (76.70% by mass) is composed of organic matter. It was observed that the amount of MSW generated during the high tourist season (January, February, and December) is about three times greater than during the low season (March to November). The CH<sub>4</sub> generation forecasts showed a maximum of 12,835.26 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> in 2042, corresponding to the maximum available electric power of 3,579.06 kW. The most advantageous scenario in environmental and economic aspects was for the three sets of generators, sized with the proposed methodology, inserted in a staggered manner over the operating time from 2024 to 2042. The installed power of the generator sets were 600 kW, 800 kW, and 1,400 kW, respectively. Operation at maximum capacity during the entire period generated 258.60 GWh, corresponding to 68 % utilization of the potential available at the landfill. The avoided CO<sub>2eq</sub> emissions were estimated at 1.63 million tons. The economic and financial indicators were US\$1,601,169.50 for the Net Present Value (NPV), 15.64% for the Internal Rate of Return (IRR), and 14 years of Payback. The economic and financial viability was verified in two of the six scenarios evaluated with the use of the methodology suggested in this research. It was concluded that the application of the methodology proposed in this research provides satisfactory results for regions with seasonality in CH<sub>4</sub> generation. Such results signal to public managers a great opportunity to generate revenue with the energy use of CH<sub>4</sub> from landfills, which contributes to the use of alternative energy sources and alleviation of environmental problems associated with landfill waste.

**Keywords:** Municipal Solid Waste. Landfill Gas. Power Forecast Method in Seasonal Environment. Xangri-Lá/RS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Série histórica do SNIS de RSU coletado anualmente em Xangri-Lá/RS.....	25
Figura 2 - Geração e coleta <i>per capita</i> de RSU no Brasil. ....	26
Figura 3 - Rotas tecnológicas de destinação final sob a luz da PNRS. ....	37
Figura 4 - Ilustração de um aterro sanitário com as principais partes constituintes.....	40
Figura 5 - PCI do biogás de acordo com a concentração de CH <sub>4</sub> .....	41
Figura 6 - Processos de digestão anaeróbica. ....	43
Figura 7 - Fases de biodegradação dos resíduos em aterro sanitário.....	44
Figura 8 - Sistemas de extração de biogás.....	49
Figura 9 - Sistemas de sucção de biogás de aterro sanitário. ....	50
Figura 10 - Exemplos de queimadores aberto (esquerda) e fechado (direita). ....	51
Figura 11 - Tratamento do biogás conforme seu uso final. ....	52
Figura 12 - Motogerador de ciclo Otto a biogás.....	53
Figura 13 - Módulos de microturbina a biogás.....	54
Figura 14 - Unidade de cogeração híbrida com turbina ciclo Rankine. ....	55
Figura 15 - Tela inicial do programa “Biogás”. ....	68
Figura 16 - Localização da área de estudo. ....	78
Figura 17 - Cronograma da coleta de RSU de Xangri-Lá/RS para baixa temporada.....	79
Figura 18 - Aterro Municipal de Capão da Canoa/RS. ....	80
Figura 19 - Procedimentos da amostragem dos RSU.....	81
Figura 20 - Inserção das provisões de resíduos calculadas no programa “Biogás”. ....	84
Figura 21 - Inserção dos parâmetros $k$ e $L_0$ no programa “Biogás”. ....	85
Figura 22 - Matriz para previsão das vazões de CH <sub>4</sub> com sazonalidade anual. ....	86
Figura 23 - Matriz para previsão das vazões de CH <sub>4</sub> com sazonalidade mensal.....	87
Figura 24 - Correspondência entre potência máxima e energia máxima. ....	90
Figura 25 - Previsão de potência pelo Método Escalonado para Motorização. ....	91
Figura 26 - Previsão de potência em ambiente sazonal.....	93
Figura 27 - Série histórica de valores de RCEs.....	99
Figura 28 - Geração de RSU em 2018.....	103
Figura 29 - Geração de RSU para os anos de 2018, 2019 e 2020. ....	103
Figura 30 - Geração de CH <sub>4</sub> estimada com o programa “Biogás”. ....	106
Figura 31 - Geração de CH <sub>4</sub> por meio do programa Microsoft Excel.....	107

Figura 32 - Distribuição da vazão de CH <sub>4</sub> para o período de 2022 a 2062 em 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /mês. ...	109
Figura 33 - Potência elétrica disponível para o período de 2022 a 2062.....	110
Figura 34 - Cenário C1.1 - Potência disponível e instalada para um grupo gerador.....	111
Figura 35 - Cenário C1.2 - Potência disponível e instalada para dois grupos geradores. ....	112
Figura 36 - Cenário C1.3 - Potência disponível e instalada para três grupos geradores. ....	113
Figura 37 - Curva de permanência de potência no tempo com sazonalidade mensal. ....	114
Figura 38 - Cenário C2.1 - Potência disponível e instalada para um grupo gerador.....	115
Figura 39 - Cenário C2.2 - Potência disponível e instalada para dois grupos geradores. ....	116
Figura 40 - Cenário C2.3 - Potência disponível e instalada para três grupos geradores. ....	117
Figura 41 - Fluxo de caixa para o cenário C1.1.....	123
Figura 42 - Fluxo de caixa para o cenário C1.2.....	124
Figura 43 - Fluxo de caixa para o cenário C1.3.....	125
Figura 44 - Fluxo de caixa para o cenário C2.1.....	126
Figura 45 - Fluxo de caixa para o cenário C2.2.....	127
Figura 46 - Fluxo de caixa para o cenário C2.3.....	128
Figura 47 - Fluxo de caixa sem investimento em geração de energia. ....	130

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais normas para implantação de aterros sanitários.....	39
Quadro 2 - Fatores que influenciam a geração de biogás nos aterros. ....	45
Quadro 3 - Impurezas do biogás, danos e técnicas de remoção. ....	47
Quadro 4 - Fatores que afetam a geração de biogás. ....	57
Quadro 5 - Principais modelos para previsão da geração de biogás em aterro sanitário. ....	62
Quadro 6 - Dados de amostragem dos RSU. ....	81
Quadro 7 - Cenários propostos para diferentes configurações de potência instalada. ....	89
Quadro 8 - Especificação dos itens do fluxo de caixa. ....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentrações dos principais metais pesados presentes no chorume. ....	28
Tabela 2 - Composição média do biogás de diferentes origens. ....	41
Tabela 3 - Valores sugeridos para $L_0$ e $k$ . ....	84
Tabela 4 - Tipos de projetos de energia e tamanhos recomendados. ....	95
Tabela 5 - Custos de investimento com sistemas de controle e queima. ....	95
Tabela 6 - Método para cálculo dos custos de investimento com grupos de geradores. ....	96
Tabela 7 - Custo de O&M para os sistemas de controle e queima. ....	97
Tabela 8 - Custos de O&M para os grupos de geradores. ....	97
Tabela 9 - Inflação anual nos Estados Unidos entre os anos de 2013 e 2021. ....	98
Tabela 10 - Índices de conversão de moedas. ....	100
Tabela 11 - Composição gravimétrica dos RSU no ano de 2018. ....	101
Tabela 12 - Previsão de geração de RSU no período de 2022 a 2028, em toneladas. ....	104
Tabela 13 - Previsão de geração de RSU no período de 2029 a 2035, em toneladas. ....	105
Tabela 14 - Previsão de geração de RSU no período de 2036 a 2042, em toneladas. ....	105
Tabela 15 - Estimativas das vazões de $\text{CH}_4$ para o período de 2022 a 2062 em $10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$ . ....	108
Tabela 16 - Potência instalada dos grupos geradores para cada cenário. ....	118
Tabela 17 - Quantidades de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ evitados. ....	119
Tabela 18 - Configuração da célula de aterro que recebem os RSU de Xangri-Lá/RS. ....	120
Tabela 19 - Custos com sistema de coleta e queima. ....	121
Tabela 20 - Custos de investimento e O&M com os grupos geradores. ....	121
Tabela 21 - Indicadores econômicos e financeiros. ....	128

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CH <sub>4</sub>	Metano
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CO <sub>2eq</sub>	Dióxido de carbono equivalente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
GEE	Gases de Efeito Estufa
H <sub>2</sub> S	Ácido sulfídrico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
LandGEM	Modelo de Emissão de Gás de Aterro
LCOE	Custo Nivelado de Energia
LFG	Gás de Aterro
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
N <sub>2</sub>	Nitrogênio
NH <sub>3</sub>	Hidróxido de amônia
O <sub>2</sub>	Oxigênio
O&M	Operação e Manutenção
PAG	Potencial de Aquecimento Global
<i>Payback</i>	Prazo de retorno do investimento
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas

PCI	Poder Calorífico Inferior
PET	Polietileno Tereftalato
PSNB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PUCRS	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
RCEs	Reduções Certificadas de Emissão
RCI	Retorno Contábil sobre o Investimento
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
S	Enxofre
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silício
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre
SO <sub>3</sub>	Trióxido de enxofre
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMA-SP	Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNS	Secretaria Nacional de Saneamento
TIR	Taxa Interna de Retorno
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
VLP	Valor Presente Líquido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>20</b>
3.1	DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS .....	21
3.2	ESTATÍSTICAS DE GERAÇÃO DE RSU .....	23
3.3	IMPACTOS DOS RSU AO MEIO AMBIENTE E NA SAÚDE .....	26
3.4	GESTÃO E GERENCIAMENTO INTEGRADO DE RSU .....	29
3.5	HIERARQUIA DE RESÍDUOS E DESMATERIALIZAÇÃO.....	32
3.6	ETAPAS DO GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS .....	33
<b>3.6.1</b>	<b>Acondicionamento .....</b>	<b>34</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Coleta .....</b>	<b>35</b>
<b>3.6.3</b>	<b>Destinação final de resíduos.....</b>	<b>35</b>
<b>3.6.4</b>	<b>Disposição final de rejeitos.....</b>	<b>38</b>
3.7	BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO .....	40
3.8	FATORES QUE INFLUENCIAM A FORMAÇÃO DO BIOGÁS .....	45
3.9	IMPUREZAS DO BIOGÁS E FORMAS DE REMOÇÃO.....	46
3.10	EXTRAÇÃO DO BIOGÁS DOS ATERROS.....	48
3.11	CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA.....	51
3.12	MODELAGEM DE GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS .....	56
<b>3.12.1</b>	<b>Modelo Biogás, geração e uso energético – aterros CETESB - versão 1.0 .....</b>	<b>67</b>
3.13	MODELAGENS DE EMISSÕES .....	70
3.14	ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA.....	73
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>77</b>
4.1	ÁREA DE ESTUDO .....	77

4.2	CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS RSU.....	81
4.3	ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RSU DE ATERRO SANITÁRIO.....	83
<b>4.3.1</b>	<b>Vazão de CH<sub>4</sub> .....</b>	<b>83</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Potência e energia disponível.....</b>	<b>88</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Potência e energia instalada.....</b>	<b>89</b>
4.4	ESTIMATIVA DAS EMISSÕES EVITADAS DE CO <sub>2</sub> eq.....	94
4.5	VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA .....	94
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>101</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS RSU .....	101
5.2	QUANTIFICAÇÃO DOS RSU.....	102
5.3	ESTIMATIVA DA VAZÃO DE CH <sub>4</sub> .....	106
5.4	ESTIMATIVA DA POTÊNCIA .....	110
<b>5.4.1</b>	<b>Método Escalonado para Motorização .....</b>	<b>110</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal.....</b>	<b>114</b>
<b>5.4.3</b>	<b>Comparação das metodologias .....</b>	<b>118</b>
5.5	ESTIMATIVA DAS EMISSÕES EVITADAS DE CO <sub>2</sub> eq.....	119
5.6	VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA .....	120
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>131</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>134</b>
	<b>APÊNDICE – FLUXOS DE CAIXA DOS CENÁRIOS ESTUDADOS.....</b>	<b>142</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são os originários de atividades domésticas nas residências, mas também da varrição, limpeza de logradouros, das vias públicas e outros serviços de limpeza urbana (BRASIL, 2010). Sua geração é um produto natural da urbanização, desenvolvimento econômico e crescimento populacional. A gestão dos resíduos é onerosa, complexa e compete pelo financiamento com outros serviços essenciais, como o tratamento de água, saúde, educação e segurança (WORLD BANK, 2018).

O mundo deverá aumentar a geração de resíduos em 70% em 2050. Os países de alta renda serão responsáveis por 19% de aumento, enquanto os países de média e baixa renda, por 40%. O aumento da geração de resíduos em função do aumento da renda é mais significativo em países em desenvolvimento, devido à maior demanda marginal de consumo (WORLD BANK, 2018).

No Brasil, cerca de 40% das 72,7 milhões de toneladas de RSU coletados em 2018 tiveram como destino lixões e aterros controlados, ou seja, foram depositados sem as condições necessárias para garantir a não contaminação do solo e dos recursos hídricos (ABRELPE, 2018). Estudos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) revelam 24,4% de disposição final inadequada para 62,78 milhões de toneladas de RSU coletados no país em 2018 (MDR.SNS, 2019a).

A questão da disposição final assume um viés ainda mais crítico, pois é observado que há cada vez menos áreas disponíveis nas cidades para sua implantação, o que acarreta uma maior distância entre os centros de geração e o destino final, com impactos econômicos e ambientais. Além disso, o aumento da geração de RSU ao longo dos anos, associado à ineficiência dos sistemas de gestão, tem propiciado a disposição final em aterros de materiais que não tiveram suas possibilidades esgotadas quanto à reutilização ou reciclagem, incluído a recuperação energética (ABRELPE; PLASTIVIDA, 2012).

No aterro sanitário, a decomposição da matéria orgânica presente nos RSU gera biogás, considerado uma das principais emissões antrópicas de metano ( $\text{CH}_4$ ), o qual é caracterizado como Gás de Efeito Estufa (GEE), com Potencial de Aquecimento Global (PAG) 28 vezes superior ao dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), considerando o período de 100 anos (IPCC, 2014). Quando o  $\text{CH}_4$  proveniente dos RSU é queimado em um motogerador ou expandido em uma turbina, ocorrem processos de oxidação que resultam em  $\text{CO}_2$  biogênico e

outros poluentes do ar, sendo que o CO<sub>2</sub> biogênico não contribui para o aquecimento global (AYODELE; ALAO; OGUNJUYIGBE, 2020).

O CH<sub>4</sub> proveniente dos RSU representa uma importante fonte de energia renovável e alternativa com potencial de substituir combustíveis fósseis para a geração de calor, força motriz e eletricidade. Sua utilização para esse fim também contribui para a valoração de resíduos e redução de seus impactos no meio ambiente e na saúde humana (NASCIMENTO *et al.*, 2019). O aproveitamento energético do CH<sub>4</sub> proveniente dos RSU também apresenta benefícios econômicos por meio da geração de riquezas a partir de matéria-prima considerada inservível e, na maioria dos casos, a preços negativos. Além disso, promove benefícios relacionados à redução das desigualdades sociais, pois a geração de riquezas pode ocorrer de forma descentralizada, uma vez que alguns processos de biorrefino dos RSU para geração de energia demandam uma etapa prévia de triagem, nas quais demandam mão-de-obra pouco qualificada e de baixa renda (EPE, 2014).

O potencial energético do CH<sub>4</sub> disponível no aterro sanitário, proveniente da decomposição anaeróbica dos RSU, pode ser estimado por meio de modelagem computacional (CETESB, 2006; FREIRE, 2018; MAJDINASAB; ZHANG; YUAN, 2017; SILVA, 2015). Para esse propósito podem ser aplicados diversos modelos disponíveis na literatura, que, de modo geral, relacionam o histórico de descarte de resíduos para prever a geração e a recuperação do CH<sub>4</sub>.

O aproveitamento do potencial energético disponível no aterro sanitário pode ser feito mediante o uso de uma tecnologia de conversão da energia química presente no CH<sub>4</sub> em energia térmica para uso direto ou para conversão em energia mecânica, que, associada a um gerador, possibilita a conversão em energia elétrica. As limitações tecnológicas dos equipamentos associadas às diversas etapas de conversão energética conferem perdas no processo e acabam por reduzir a potência elétrica instalada dos equipamentos de geração de energia elétrica.

A estimativa da potência instalada acerca do uso do CH<sub>4</sub> de aterros sanitários é um tema escasso na literatura, sendo que grande parte dos trabalhos determinam as potências sem uma metodologia definida, por meio da adoção de potências e números de geradores, cada um segundo seu critério (SANTOS, 2015). Nesse sentido, autores como Silva (2012) e Santos (2015), propuseram métodos de determinação de potência instalada para geração de benefício máximo. Contudo, esses métodos analisam a geração de energia a partir do estudo das vazões de CH<sub>4</sub> com periodicidade anual de tempo. O uso desses métodos em aterros com

sazonalidade expressiva no recebimento de RSU ao longo dos meses do ano, caso de aterros que recebem resíduos de regiões com grandes flutuações populacionais, tais como as regiões litorâneas, apresentam, erroneamente, tendência de inviabilidade econômica e financeira.

Nesse sentido, o presente trabalho propôs um método capaz de considerar a sazonalidade na geração de resíduos ao longo dos meses do ano e sua influência na vazão de  $\text{CH}_4$  para previsão da potência elétrica instalada de grupos geradores, aqui denominado de “Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal”.

O método proposto foi aplicado no contexto da geração de RSU do município de Xangri-Lá. Esse município está localizado na região do litoral norte do Estado do Rio Grande do Sul, cuja economia é baseada, principalmente, no turismo de litoral, o que confere dinâmicas populacionais, que resultam em expressiva flutuação sazonal na geração de RSU. Os potenciais elétricos instalados dos grupos geradores foram previstos mediante o estabelecimento de três cenários de motorização, cada um com uma quantidade distinta de grupos geradores e tempos de operação. Três cenários foram dimensionados por meio do Método Escalonado para Motorização, desenvolvido por Santos (2015), e comparados com outros três cenários dimensionados por meio da metodologia proposta. As configurações obtidas foram submetidas à análise de viabilidade econômica e financeira com vistas à compensação de energia elétrica com a concessionária e venda de Reduções Certificadas de Emissão (RCEs) para os países desenvolvidos.

A expectativa é que a presente proposta possa subsidiar futuros projetos de aproveitamento do  $\text{CH}_4$  de aterro sanitário para geração de energia elétrica, oferecer suporte científico aos atores políticos e privados no direcionamento de recursos para a autoprodução de energia, contribuir para a utilização de fontes energéticas alternativas e mitigar os impactos ambientais negativos associados aos resíduos de aterros.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa teve como objetivo geral propor um método de previsão de potência elétrica instalada de grupos geradores para conversão térmica do  $\text{CH}_4$  decorrente da decomposição dos RSU dispostos em aterro sanitário localizado em região com expressiva sazonalidade na geração de RSU ao longo dos meses do ano, tendo como estudo de caso o município de Xangri-Lá/RS. Além disso, realizou-se análise de viabilidade econômica e financeira de diversos cenários de motorização de grupos geradores e comparativamente com metodologia amplamente utilizada na literatura. Esses estudos visam subsidiar futuros projetos de redução dos custos com energia elétrica do município, contribuir para a utilização de fontes energéticas alternativas e amenizar problemas ambientais associados aos resíduos de aterros.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos da presente pesquisa, compreenderam:

- Estudar o estado da arte sobre o tema relacionado à pesquisa, por meio de revisão bibliográfica;
- Descrever a área de estudo e caracterizar os RSU, mediante levantamento das quantidades geradas e da análise gravimétrica;
- Estimar as vazões de  $\text{CH}_4$  decorrente da decomposição dos RSU em aterro sanitário com periodicidade anual e mensal;
- Estimar o potencial de geração de energia elétrica disponível, a partir da queima do  $\text{CH}_4$  gerado em aterro sanitário;
- Estimar o potencial de geração de energia elétrica instalada de grupos geradores por meio do “Método Escalonado para Motorização”, com periodicidade anual na geração de  $\text{CH}_4$ ;
- Estimar o potencial de geração de energia elétrica instalada de grupos geradores por meio do “Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal”, proposto neste trabalho, com periodicidade mensal na geração de  $\text{CH}_4$ ;

- Estimar as emissões evitadas de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  em decorrência do aproveitamento energético do  $\text{CH}_4$ ;
- Realizar os estudos e viabilidade econômica e financeira dos diferentes cenários de motorização, com vistas à compensação de energia elétrica com a concessionária e venda de RCEs para os países desenvolvidos;
- Estimular a utilização de RSU como fonte alternativa de energia, contribuindo para a amenização dos problemas ambientais provocados pelos resíduos de aterros.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

O estado da arte, ou o estado do conhecimento sobre o tema relacionado à presente pesquisa, foi construído a partir de três principais fases. Fase 1: Planejamento; Fase 2: Execução da revisão e Fase 3: Sumarização da revisão, conforme descrito por Moraes (2019).

Na Fase 1 foi desenvolvido um protocolo de busca baseado nas palavras-chaves relacionadas ao tema para pesquisa na Biblioteca da UFSC e em motores de busca de sítios eletrônicos tais como: Periódicos CAPES/MEC, Science Direct, SciELO, Google Acadêmico, dentre outros. As principais palavras-chaves usadas foram: Resíduos sólidos urbanos, Gás de aterro, Energia de resíduos, Gases de Efeito Estufa e Xangri-Lá/RS. Também foram usadas palavras-chaves secundárias para desenvolver assuntos importantes relacionados à pesquisa, tais como: Saúde humana, Meio ambiente, Modelagem computacional, Viabilidade econômica e financeira, por exemplo.

Na Fase 2 foi estudada a maior quantidade possível de trabalhos para extração dos dados relevantes. Foram consideradas as produções acadêmicas publicadas em periódicos de revistas especializadas, livros, relatórios técnicos, trabalhos de conclusão de cursos, dissertações e teses. Com o objetivo de entender os aspectos e as dimensões abordadas pelo Estado e pelo Terceiro Setor, também foram consultados documentos governamentais, manuais e relatórios de entidades não governamentais de renome nacionais e internacionais.

Na Fase 3 foi apresentado um encadeamento de ideias de caráter descritivo da produção científica relacionada ao tema de pesquisa. Buscou-se a construção de um texto robusto, consistente e confiável, com citações feitas conforme preconizado na ABNT NBR 10.520/2002 (ABNT, 2002).

O desenvolvimento da Fase 3 incluiu a definição e classificação dos resíduos, e suas estatísticas de geração. Foram abordados os principais impactos negativos ao meio ambiente e na saúde humana, a gestão e o gerenciamento integrado e os conceitos de hierarquia de resíduos e desmaterialização. Foram discutidas as etapas do gerenciamento dos resíduos, as principais informações relacionadas ao biogás de aterro, os fatores que influenciam sua formação, suas impurezas e técnicas de remoção, a extração do biogás dos aterros e seu aproveitamento energético. Foram abordadas as principais modelagens para estimativa de geração de biogás em aterros sanitários, modelagens de emissões e análise de investimentos. Esses estudos serviram para fundamentar os procedimentos metodológicos previstos nesta pesquisa e para subsidiar a discussão dos resultados e conclusões.

### 3.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS

O termo resíduo, em função da proximidade dos conceitos, é empregado como sinônimo de lixo, sendo que esse termo carrega consigo um peso que lhe atribui um domínio conceitual de repúdio e está ficando aos poucos em desuso. Os resíduos são produzidos pelas mais variadas atividades humanas e apresenta, portanto, grande diversidade em sua constituição (TENÓRIO; ESPINOSA, 2004).

A definição contemporânea dos resíduos, considerando os avanços da Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010, regulamentada pelo Decreto 7.404, de 23 de dezembro de 2010, que dispõe sobre a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), pode ser expressa como:

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

Segundo a mesma Lei, o termo reciclagem é o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolvem a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes. Por sua vez, reutilização é definida como o processo de aproveitamento dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-química, observadas também as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes. O termo rejeito se refere ao material que teve esgotada sua vida útil, considerando as dimensões tecnológicas e econômicas, ou seja, quando não há tecnologia para sua recuperação e conversão em outras formas úteis ou se esta não for economicamente viável. Nesta condição, o rejeito deve ser submetido à disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Dessa forma, tanto os resíduos quanto os rejeitos podem ser entendidos como os resultados das demandas servidas à sociedade, inservíveis aos propósitos originais que os demandaram. Contudo, enquanto os rejeitos representam os materiais que esgotaram suas possibilidades de aproveitamento, os resíduos guardam em sua constituição um potencial técnico e economicamente viável, para reutilização, reciclagem, compostagem ou outras formas de valoração energética e, assim, a possibilidade de reinserção na cadeia produtiva.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio da norma NBR 10.004/2004 considera a diversidade, a complexidade dos resíduos sólidos, a variedade de setores e de atividades de que eles se originam para definir os resíduos sólidos como aqueles resíduos, nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Consideram-se, também, resíduos sólidos, os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como, determinados líquidos, cujas particularidades tornem inviáveis seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções tecnicamente e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004).

A mesma norma NBR 10.004/2004 classifica os resíduos sólidos quanto a seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública e dividindo-se em: Resíduos Classe I (perigosos), os quais apresentam risco à saúde pública ou ao ambiente, caracterizando-se por possuir propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade; Resíduos Classe II A (não perigosos e não inertes), que são os que não apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, porém, apresentam propriedade de solubilidade em água a concentrações superiores aos padrões de potabilidade, excetuando-se os aspectos de cor, turbidez, dureza e sabor, existindo a possibilidade de haver reação com o meio ambiente, e, conseqüentemente, risco de poluição; Resíduos Classe II B (não perigoso e inerte), que representam os que não apresentam características perigosas e não tem constituinte algum solubilizado em concentração superior ao padrão de potabilidade da água.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos sólidos são classificados da seguinte forma:

I - quanto à origem:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas "a" e "b";
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas "b", "e", "g", "h" e "j";
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea "c";
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;

- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
  - i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
  - j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
  - k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;
- II - quanto à periculosidade:
- a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
  - b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea “a” (BRASIL, 2010).

Outros autores classificam os resíduos provenientes de biomassa em: primários, que são aqueles produzidos na agricultura e silvicultura; secundários, os gerados durante o processo produtivo (indústrias de alimentos, de bebidas e de papéis, entre outras); terciários, que são resultantes dos pós-uso dos resíduos secundários e corresponde a fração orgânica dos RSU (HOOGWIJK *et al.*, 2003).

### 3.2 ESTATÍSTICAS DE GERAÇÃO DE RSU

No Brasil, quando se trata de fontes de informações relativas às quantidades de resíduos gerados no país, destacam-se os estudos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), as séries históricas do SNIS e o Panorama dos resíduos sólidos no Brasil que é realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE).

O IBGE, em convênio com o Ministério das Cidades, realizou a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PSNB). Essa serviu de subsídio para produção do Plano Nacional de Saneamento Básico (PNSB), que constituiu o eixo central da política federal para o setor. Em sua primeira versão, realizada em 1983, a PSNB contemplou a questão de limpeza urbana e coleta de lixo. Aprimorada ao longo dos anos, essa pesquisa tornou-se, a partir da versão publicada em 1989, uma referência nacional e fonte principal de fornecimento de dados para todas as análises de avaliações sobre gestão e geração de RSU, em nível nacional e regional. Todavia, a realização/publicação da PSNB não ocorreu de forma regular, sendo a última divulgação em 2008 (IBGE, 2010).

O SNIS é um sistema de informações consolidado no setor de saneamento básico como o mais robusto banco de dados existente no país sobre serviços de saneamento. Composto por informações sobre serviços de água e esgotos (SNIS-AE), manejo de RSU (SNIS-RS) e drenagem e manejo de águas pluviais (SNIS-AP), o SNIS abrange os aspectos institucionais, técnico-operacionais, administrativos, econômico-financeiros e de qualidade dos serviços prestados (MDR.SNS, 2019a). As séries históricas do SNIS são desenvolvidas e atualizadas pela Secretaria Nacional de Saneamento (SNS) do Ministério do Desenvolvimento Regional. As informações do SNIS são fornecidas voluntariamente e anualmente, e provêm de prestadores de serviços ou órgãos municipais encarregados da gestão dos serviços, sendo a base de dados totalmente pública e gratuita.

O Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, realizado pela ABRELPE, é uma das fontes de informação mais abrangente e atualizada sobre os principais componentes da gestão de resíduos sólidos no País. O mesmo foi criado com o objetivo de facilitar o acesso dos órgãos governamentais, das empresas públicas e privadas, das organizações não governamentais, entidades educativas, da imprensa e da sociedade em geral, às informações sobre os resíduos sólidos em seus diversos segmentos, que, em muitos casos estão, fracionadas e/ou desatualizadas (ABRELPE, 2019).

Dessa forma, tendo em vista a necessidade de uso de dados mais atualizados de geração de resíduos, na presente pesquisa são abordados os dados divulgados nas séries históricas do SNIS e do Panorama da ABRELPE.

Em 2018, o SNIS contabilizou 92,1% de cobertura do serviço regular de coleta domiciliar de resíduos sólidos. A abrangência do estudo considerou uma amostra de 3.468 municípios, correspondes a 62,3% do total de municípios do país. Ao considerar a população dos municípios do país, o percentual de abrangência se eleva para 81,5% (MDR.SNS, 2019b).

A coleta de resíduos domiciliares e públicos nos municípios brasileiros em 2018 atingiu o montante anual de 62,78 milhões de toneladas. Assim, o indicador médio de coleta *per capita* brasileiro ficou no patamar de 0,96 kg (hab.dia)<sup>-1</sup> (MDR.SNS, 2019b).

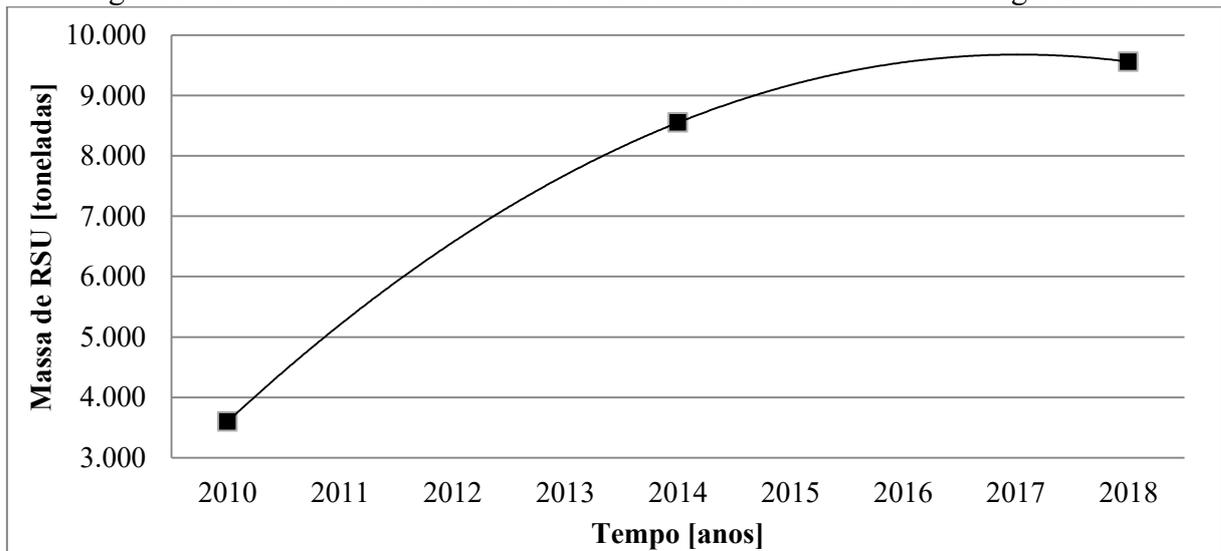
Quanto à coleta seletiva, o diagnóstico apontou a presença do serviço em 38,1% dos municípios do Brasil, com destaque para as parcerias entre catadores na coleta seletiva e o poder público, os quais foram responsáveis por 30,7% do total de massa coletada seletivamente. Os dados perfazem o indicador médio de 14,4 kg (hab.ano)<sup>-1</sup> de resíduos recicláveis coletados (MDR.SNS, 2019b).

Com relação aos custos, o SNIS aferiu R\$ 130,47 anualmente por habitante em 2018, correspondentes a um total de R\$ 22 bilhões gastos com o manejo de resíduos sólidos em todo o País, sendo que 47,0 % dos municípios brasileiros fazem a cobrança pelos serviços e o valor cobrado cobre 54,3% dos custos (MDR.SNS, 2019b).

Dos 62,78 milhões de toneladas de resíduos coletados, 75,6% tiveram sua disposição final ambientalmente adequada, ou seja, em aterros sanitários. O restante, 24,4% do total disposto em solo em 2018, teve disposição final considerada inadequada, sendo 11,4% em aterros controlados e 13,0% em lixões (MDR.SNS, 2019b).

Na Figura 1 são apresentados os dados disponíveis das séries históricas dos SNIS para o município de Xangri-Lá no período de 2010 e 2017. Os dados revelam enorme ausência de informações oficiais no sistema nacional relativas à municipalidade (MDR.SNIS, 2020).

Figura 1 - Série histórica do SNIS de RSU coletado anualmente em Xangri-Lá/RS.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A mesma pesquisa realizada pela ABRELPE aponta 4.070 municípios com alguma iniciativa de coleta seletiva, representando 73,1% dos municípios. Do montante total de resíduos coletados, segundo o Panorama, 59,5% foram dispostos de forma adequada em aterros sanitários. O restante, 40,5% dos resíduos coletados, foi despejado em locais inadequados, sendo 17,5 % em lixões e 23,0 % em aterros controlados (ABRELPE, 2019).

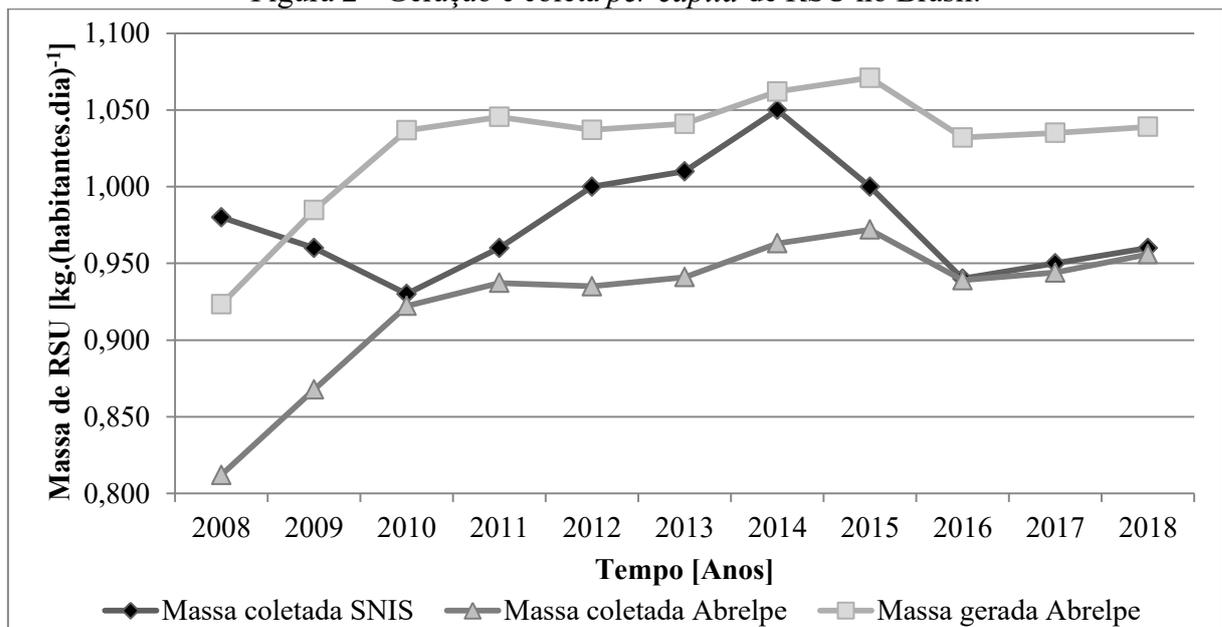
Os recursos aplicados pelos municípios foram, em média, de R\$10,15 por habitante por mês ou R\$ 121,80 por habitante em 2018, correspondente ao montante de cerca de R\$

25,86 bilhões para fazer frente a todos os serviços de limpeza urbana no Brasil (ABRELPE, 2019).

O documento apresenta, ainda, dados com relação aos empregos diretos gerados pelo setor de limpeza urbana, perfazendo 332 mil empregos. Também é mencionado o tamanho do mercado de limpeza urbana no Brasil, estimado em R\$ 28,1 bilhões no ano de 2018 (ABRELPE, 2019).

Guardadas as diferenças numéricas apresentadas nos estudos da ABRELPE e do SNIS, muito em função das diferentes metodologias empregadas nos levantamentos realizados e às dificuldades inerentes a esse tipo de avaliação, ambos apresentam convergência e tendência de crescimento de geração *per capita* de resíduos, nos últimos três anos, conforme descrito na Figura 2.

Figura 2 - Geração e coleta *per capita* de RSU no Brasil.



Fonte: Elaborado pelo Autor a partir de (ABRELPE, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2018, 2019; MDR.SNS, 2019b, 2019a).

### 3.3 IMPACTOS DOS RSU AO MEIO AMBIENTE E NA SAÚDE

Os RSU acondicionados de forma inapropriada para coleta, ou mesmo aqueles que não são coletados pelos serviços de coleta municipal, causam poluição visual e atraem vetores causadores de doenças (IBGE, 2010). Por consequência da ação de ventos e chuvas, os RSU podem ser carregados para os sistemas de drenagem urbana, obstruindo a passagem das águas pluviais, possibilitando a ocorrência de enchentes, em função do regime pluviométrico. A

propriedade de fluência dos sistemas de drenagem urbana confere a esses sistemas grande capacidade de veiculação de cargas poluidoras, tornando-os, assim, um importante agente de degradação dos corpos hídricos (GAVA; FINOTTI, 2012).

Trabalhos da literatura chamam a atenção ao fato de que parte dos resíduos não coletados ou que não tiveram seu destino adequado podem entrar no ambiente marinho, principalmente na forma de plásticos e micro plásticos (IVAR DO SUL *et al.*, 2011; SCHNEIDER; MAFFESSIONI; BENVENUTI, 2016). Há décadas já se tinha relatos de trabalhos alertando sobre os impactos causados pelos materiais plásticos à biodiversidade, devido ao seu poder de se emaranhar à estrutura física, ou entrar no trato digestivo da fauna, podendo causar efeitos fisiológicos e comportamentais deletérios (LAIST, 1997).

Uma vez coletados, os RSU, dependendo da forma como são destinados, geram diferentes impactos no meio ambiente. No Brasil, as três principais formas de disposição final dos RSU são aterro sanitário, aterro controlado e lixão ou vazadouro. O aterro sanitário, em tese, é projetado para haver estanqueidade e tratamento dos efluentes de acordo com as normas e legislação vigente. Seu risco de contaminação está associado a falhas em sua operação. No aterro controlado, são utilizados alguns princípios de engenharia para confinar os resíduos e, geralmente, apresentam uma camada de solo na superfície, mas não dispõe de impermeabilização da base e não possuem sistema de tratamento de percolados ou chorume. No lixão, a disposição é caracterizada pela simples descarga sobre o solo que ali ficam a céu aberto (CEMPRE, 2018).

Na disposição final, os RSU possibilitam diferentes impactos no meio ambiente, que se relacionam às diferentes etapas do processo de decomposição, associado à sazonalidade das águas pluviais que percolam a massa de resíduos (BAIRD; CANN, 2011). Um dos produtos da decomposição biológica da fração orgânica dos resíduos no aterro ou lixão é o chorume, o qual se caracteriza como mistura líquida complexa formada de elementos desprendidos pelo processo de lixiviação. O mesmo apresenta composição química bastante variada, intimamente ligada às características químicas dos compostos orgânicos e inorgânicos presentes na massa de resíduos (CEMPRE, 2018). O chorume é o principal agente de contaminação dos solos, das águas superficiais e subterrâneas, sendo que essa contaminação se mantém, mesmo depois da desativação do lixão, aterro controlado ou aterro sanitário que apresentam falhas na operação ou execução (GOUVEIA, 2012).

Metais estão, comumente, presentes na composição do chorume, sendo que as concentrações dos principais metais nos diferentes estágios de decomposição dos resíduos são

descritas na Tabela 1, com base em dados compilados da literatura. Esses estágios são divididos em duas fases: Fase ácida, em que o chorume é caracterizado pela elevada concentração de ácidos voláteis, matéria orgânica e pH baixo, sendo que nessas condições a microbiota ainda não teve tempo de se desenvolver; Fase metanogênica, marcada pelo desenvolvimento da microbiota, que converte os ácidos voláteis em gás carbônico e CH<sub>4</sub>, sendo que o chorume possui nessa fase baixa carga orgânica, pH alto e concentrações significativas de nitrogênio amoniacal (CALIJURI; CUNHA, 2013).

Tabela 1 - Concentrações dos principais metais pesados presentes no chorume.

Componente	Fase ácida		Fase metanogênica	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Cádmio (mg/L)	-	0,09	-	0,1
Chumbo (mg/L)	-	1,3	-	1,1
Zinco (mg/L)	-	7	0,01	2

Fonte: Elaborado pelo Autor a partir de (CALIJURI; CUNHA, 2013).

Os metais são tóxicos aos organismos, principalmente, na forma de íons ou combinados com substâncias que aumentam sua solubilidade na água, facilitando a absorção. Os metais se ligam às biomoléculas, prejudicando suas funções. Além deles, o chorume apresenta micro poluentes ou micro contaminantes que, devido à prolongada exposição, podem resultar em alterações ao organismo humano e de outros animais, mesmo presentes em pequenas concentrações (CALIJURI; CUNHA, 2013).

Os processos de decomposição da matéria orgânica dos RSU geram, além do chorume, o biogás, que é considerado uma das principais emissões antrópicas de CH<sub>4</sub>, o qual é caracterizado como GEE, com PAG 28 vezes superior ao CO<sub>2</sub>, considerando o período de 100 anos (IPCC, 2014). O biogás é composto, principalmente, por CH<sub>4</sub> (40 a 55%), seguido pelo CO<sub>2</sub> e compostos orgânicos voláteis e não metano (NMOCs). O CH<sub>4</sub> não é um gás tóxico, porém, em concentrações elevadas, pode substituir o Oxigênio (O<sub>2</sub>) do sangue podendo levar à asfixia. O principal risco imediato do CH<sub>4</sub> está associado a seu efeito explosivo (da ordem de 35.310.000 µg.m<sup>-3</sup>). Os efeitos cancerígenos do biogás são atribuídos aos demais gases de sua composição. O CH<sub>4</sub> liberado nos aterros em todo mundo representam 5% dos GEE. Apesar do CO<sub>2</sub> apresentar menor concentração em relação ao CH<sub>4</sub> na mistura de biogás, as suas emissões são preocupantes, pois pode representar um incremento de 36% nas concentrações de CO<sub>2</sub> nas proximidades onde o aterro está instalado (TALAIKHOZANI *et al.*, 2018).

Os depósitos de RSU constituem relevante fonte de exposição das populações vizinhas a várias substâncias tóxicas, as quais aumentam os riscos de desenvolvimento de diversos tipos de câncer, anomalias congênitas, baixo peso ao nascerem, mortes neonatais, alterações na função pulmonar, contaminação bacteriológica do sistema respiratório e exposição a agentes infecciosos como o vírus da hepatite B (GOUVEIA, 2012). Doenças como a leptospirose, peste bubônica, tifo murino, febre tifoide, salmonelose, cólera, amebíase, disenteria, giardíase, malária, leishmaniose, febre amarela, dengue e filarirose estão relacionadas a vetores atraídos pelos resíduos, tais como insetos, moscas, baratas e roedores (PEREIRA; ALEIXO, 2018).

A relação intrínseca entre os resíduos e a sanidade ambiental, com efeitos significativos à saúde humana, oportuniza e eleva a importância do desenvolvimento de ações relacionadas à gestão e ao gerenciamento dos RSU, de forma que princípios de engenharia sejam harmonizados à viabilidade econômica e, assim, os impactos dos RSU no ambiente possam ser mitigados.

### 3.4 GESTÃO E GERENCIAMENTO INTEGRADO DE RSU

O gerenciamento integrado de RSU é aquele cujo desenvolvimento baseia-se em critérios sanitários, ambientais e econômicos, de forma a promover, por parte da administração pública municipal, um conjunto articulado de ações normativas, operacionais, financeiras e de planejamento com o objetivo de coletar, segregar, tratar e dispor os resíduos sólidos gerados no município (TENÓRIO; ESPINOSA, 2004).

No Brasil, muitas vezes, os termos gestão e gerenciamento são usados como sinônimos. A literatura americana emprega para ambos a expressão em inglês *management*, sem distinção, pressupondo-se que seus significados estão englobados numa única palavra (PAVAN, 2010).

A PNRS (Lei 12.305/2010) regulamentada pelo Decreto 7.404/2010 define gerenciamento de resíduos sólidos, como sendo o conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos. A mesma Lei define gestão integrada de resíduos sólidos como o conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de

forma a considerar as dimensões ambiental, social, cultural, política e econômica, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável (BRASIL, 2010).

Por esse entendimento, o gerenciamento está inserido como etapas no campo da gestão. Assim, o gerenciamento guarda afinidade ao aspecto operacional do conjunto de atividades envolvidas com os resíduos sólidos e a gestão está relacionada à elaboração de diretrizes para disciplinar o gerenciamento, considerando as dimensões definidas na PNRS.

As autoridades municipais são responsáveis pelo gerenciamento integrado dos RSU, de acordo com a Constituição Brasileira de 1988, artigo 30, incisos I, II e V. Essa responsabilidade é intransferível e traz em seu escopo a necessidade de articular e desenvolver ações com o objetivo de promover os serviços de limpeza pública, estabelecendo parâmetros para o seu desenvolvimento.

Os serviços de limpeza pública podem ser executados diretamente pelos poderes públicos municipais ou indiretamente, por meio de terceirização. O custeio dos serviços é suportado, legalmente, pela taxa de limpeza pública, que se vincula geralmente ao imposto territorial urbano, conforme definido no artigo 145, inciso II da Constituição Brasileira de 1988. Os recursos oriundos da taxa de limpeza pública não cobrem as despesas necessárias à prestação do serviço em grande parte dos municípios brasileiros, assim, o restante dos recursos necessários é suportado por outras fontes de arrecadação (TENÓRIO; ESPINOSA, 2004). Os custos dos orçamentos municipais com resíduos variam de 4% em países de elevada renda a 20% em países de menor renda. Nos países de elevada renda, os custos com a gestão integrada de resíduos sólidos superam os US\$ 100 por tonelada. Nos de menor renda, os custos são da ordem de US\$ 35 por tonelada (WORLD BANK, 2018).

A gestão de resíduos sólidos enfrenta diversos desafios, dos quais podem ser destacados: a geração de resíduos em grandes quantidades; geração de resíduos em pequenas e médias comunidades com poucos recursos financeiros; relação água/resíduos; e educação ambiental (CEMPRE, 2018).

A geração de resíduos em grandes quantidades está associada, principalmente, a dois fenômenos que corroboram de forma significativa para complexidade de sua gestão. Primeiro, o aumento populacional que faz aumentar, naturalmente, as quantidades de resíduos gerados. Segundo, a concentração das populações nas áreas urbanas que consomem grandes quantidades de água, de energia, de alimentos e de matérias-primas e geram significativas quantidades de resíduos que precisam ser dispostos de maneira segura e sustentável (CEMPRE, 2018).

O fenômeno da geração de resíduos é complexo, pois envolve questões culturais, psicológicas, econômicas, tecnológicas, ambientais, dentre outras. É fato que todos os produtos do cotidiano, mais cedo ou mais tarde, resultarão em resíduos, sejam pelas constantes atualizações ou pelos acelerados processos de obsolescência programada a eles incorporados, ou mesmo pelo esgotamento de sua capacidade de reuso e reciclagem (PERELLO; DEMOLINER, 2017). Esse fato se agrava num contexto cultural que teve os atributos de reconhecimento social baseados em títulos, transferidos para a capacidade de consumo, ou seja, quando não há títulos de nobreza nem superioridade de sangue, os indivíduos passam a ser reconhecidos, avaliados e julgados pelo que consomem (CANCLINI, 2006). Estimulados pelas aprimoradas técnicas mercadológicas, os indivíduos consomem além do que é necessário para manutenção das necessidades, corroborando para intensificação da crise ambiental (PERELLO; DEMOLINER, 2017).

A problemática relacionada à geração de resíduos em comunidades médias e pequenas, com poucos recursos financeiros, afeta cerca de 70% dos municípios brasileiros. Dos 5.570 municípios, 3.824 (69%) possuem menos de 50 mil habitantes e 41 (1%) municípios possuem mais de 500 mil habitantes. Os municípios com menos de 50 mil habitantes, geralmente, não possuem dotações orçamentárias suficientes para arcar com todos os custos envolvidos na gestão dos resíduos e, geralmente, não possuem equipe técnica com treinamento adequado para o planejamento e dimensionamento do conjunto de ações que compõem a gestão de resíduos (CEMPRE, 2018; TCE-RS, 2019).

A relação entre água e resíduos é intrínseca, pois sendo a água um solvente universal, em contato com as massas de resíduos, promove a lixiviação dos contaminantes, que se dispersam no meio ambiente por meio dos recursos hídricos. Além disso, um processo fundamental na gestão de resíduos encontra-se na reciclagem, que uma vez instituída, evita a utilização intensiva de recursos hídricos necessários à produção de produtos a partir de matéria-prima virgem (HUANG *et al.*, 2016).

Há duas décadas, Nogueira (2000) relatou problemas que, atualmente, ainda persistem em nossa sociedade, como o excesso na produção de resíduos, as falhas na sua separação e no acondicionamento por parte da população, a baixa capacidade dos técnicos envolvidos nos sistemas de saneamento, na qual decorrem decisões equivocadas, dentre outros. A falta de aderência das pessoas a procedimentos simples de saneamento, por exemplo, na separação dos resíduos na fonte, pode ser explicada por falhas ou falta de educação ambiental (NOGUEIRA, 2000).

A educação ambiental é ferramenta essencial no processo de construção do pensamento crítico, a partir do reconhecimento que os desequilíbrios ambientais estão relacionados, intrinsecamente, às condutas humanas inadequadas no sistema de causa e efeito entre o ser humano e a natureza. Assim, a educação ambiental possibilita uma visão holística, ao mesmo tempo em que correlaciona diferentes temas, visando a uma maior compreensão sobre os sistemas. A temática relacionada aos resíduos é uma questão transversal e afeta diversas outras temáticas, podendo ser abordada de forma conjunta para um maior aprendizado (ALMEIDA *et al.*, 2019).

### 3.5 HIERARQUIA DE RESÍDUOS E DESMATERIALIZAÇÃO

A hierarquia de resíduos é entendida como ferramenta ou estratégia sustentável no gerenciamento dos mesmos. A hierarquia prioriza práticas que vão da prevenção de resíduos ao aterro sanitário e traz a prevenção da geração de resíduos como primeira diretriz, enquanto que os resíduos que não puderam ser prevenidos devem ser reutilizados ou reciclados, e os resíduos que não puderam ser reutilizados ou reciclados devem ser descartados. Assim, tem-se origem o termo “3Rs” (reduzir, reutilizar e reciclar), que foi incorporado em diversos países com o objetivo de desviar ou reduzir os resíduos que seriam encaminhados ao aterro (VAN EWIJK; STEGEMANN, 2016).

Essas práticas permeiam a cultura de sociedades que alcançam o entendimento de que os resíduos são um problema de saúde pública e compreendem o quanto são onerosos os sistemas de gerenciamento. Esse entendimento e compreensão estão consolidados em países desenvolvidos, especialmente nos países europeus, nos quais seus povos e governos são compelidos a se posicionarem frente ao cenário de escassez de áreas para disposição final ambientalmente adequada de resíduos sólidos (NETO, 2019).

A redução da geração de resíduos compõe um dos principais aspectos do conceito de desmaterialização, que pode ser definida como a redução das quantidades de materiais necessários para desempenhar uma função econômica. Assim, a desmaterialização, de forma abrangente, reduz a pressão sobre os sistemas ambientais nas duas extremidades da cadeia de consumo, tanto na redução de insumos de matérias-primas, quanto na redução dos resíduos. A redução da pressão sobre sistemas ambientais pela desmaterialização promove a sustentabilidade na manutenção das funções ambientais fornecidas por esse sistema, essencial para a manutenção do bem estar humano (VAN EWIJK; STEGEMANN, 2016).

A desmaterialização assume viés generalista, relacionando a degradação ambiental à produtividade do material, no âmbito da produção econômica. Ao considerar a dimensão da desmaterialização relacionada à redução dos resíduos, tem-se um importante elemento na hierarquia de resíduos, que diz respeito a uma ordem prioritária para opções de seu gerenciamento. Contudo, seguir a hierarquia de resíduos não economiza, necessariamente, recursos naturais e nem garante o melhor resultado do ponto de vista ambiental, pois a hierarquia não se aplica em certos materiais, principalmente por que a reciclagem se distingue muito nas diferentes cadeias de produtos e a prevenção não evita a extração de materiais primários para confecção de produtos para estoque (VAN EWIJK; STEGEMANN, 2016).

Indicadores de geração de RSU, de volume de aterros sanitários ou de porcentagem geral de resíduos descartados em aterros podem subsidiar políticas públicas em prevenção da geração de resíduos, que está relacionado ao conceito de “desperdício zero” (DEUS *et al.*, 2020).

### 3.6 ETAPAS DO GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS

As etapas do gerenciamento dos resíduos podem ser entendidas como o encadeamento de processos associados aos diferentes estágios do ciclo dos resíduos. De incômodo doméstico a passivo econômico e ambiental ao poder público, os resíduos passam por diversas etapas que exigem diferentes técnicas de manejo para proteção ambiental e economicidade (CALDERONI, 2003).

As fases de gerenciamento dos RSU têm seu início na geração, ou seja, quando o produto encerra seu tempo de vida e torna-se resíduo ou rejeito. Nesse momento, surge a necessidade do adequado acondicionamento, de forma a possibilitar a destinação final ambientalmente adequada. A destinação final está associada a alguma forma de valoração dos resíduos, dentre as quais, a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação, o aproveitamento energético entre outras. A destinação, por definição, se diferencia da disposição final ambientalmente adequada, a qual compreende a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2010). As principais etapas envolvidas no gerenciamento de resíduos compreendem o acondicionamento, a coleta, a destinação final e disposição final dos resíduos, as quais estão descritas nas Subseções que se seguem.

### 3.6.1 Acondicionamento

O acondicionamento eficiente dos RSU, de responsabilidade do gerador, é aquele feito em recipientes constituídos de materiais com capacidade de suporte, adequada vida útil, estanqueidade e dimensões tais que limitem o peso máximo para possibilitar a facilidade de manuseio, seja de forma manual ou mecanizada. Os tipos de resíduos e sua quantidade também são variáveis fundamentais na determinação da melhor forma de acondicionamento (CEMPRE, 2018).

Os principais materiais utilizados no acondicionamento dos RSU são recipientes metálicos, de madeira e recipientes plásticos rígidos ou flexíveis (no caso dos sacos plásticos). Os requisitos e métodos de ensaio são normatizados pela ABNT NBR 9.191 (05/2008) – Sacos plásticos para o acondicionamento de lixo e IPT-NEA-59 - Saco para lixo: especificação. Para a diferenciação das cores para os diferentes tipos de resíduos deve ser observada a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 25 de 25 de abril de 2001. Essas normas são, especialmente, necessárias nas contratações públicas e programas de educação ambiental para coleta seletiva.

Em nível domiciliar, é suficiente o acondicionamento distinto em “reciclável” e “não reciclável”, sendo que os resíduos devem ser confinados para evitar acidentes, proliferação de insetos, impacto visual e olfativo. A entrega para coleta deve ser feita próximo do horário de passagem do equipamento de coleta de resíduos, que deve operar de forma regular a fim de possibilitar previsibilidade aos munícipes (CEMPRE, 2018).

Legislações municipais podem disciplinar o acondicionamento dos resíduos de acordo com as especificidades locais, nas quais as legislações nacionais, por seu caráter generalista, não são capazes de alcançar. Exemplo disso é observado no município de Xangri-Lá/RS que, por meio do Decreto nº 12 de 20 de fevereiro de 2020, dispõe sobre a utilização de cores distintas nos sacos e contêineres para coleta dos resíduos sólidos secos e úmidos. O Decreto adota a cor azul para os sacos que acondicionam os resíduos recicláveis e as demais cores para os resíduos úmidos. Desta forma, o referido Decreto, juntamente a um programa de educação ambiental, possibilita o acondicionamento distinto pela população, servindo, portanto, para identificar os resíduos recicláveis e aumentar a eficiência da coleta seletiva.

### **3.6.2 Coleta**

A segunda fase do gerenciamento dos RSU é a coleta. Segundo preceitos estabelecidos na legislação e normas vigentes, a coleta dos RSU deve ter seu início nas residências, pequenos comércios e estabelecimentos públicos, e fim na central de tratamento ou triagem, antes da disposição final ambientalmente adequada. A coleta é considerada a etapa mais complexa e onerosa das etapas de gerenciamento, tendo em vista a heterogeneidade dos resíduos, a obrigatoriedade da coleta seletiva e a enorme gama de equipamentos (TOMACHESKI, 2014).

A coleta pode ser feita por diferentes tipos de equipamentos, sejam eles de tração animal, mecânica, com carrocerias sem compactador do tipo basculantes ou fixas e com carroceria provida de compactador. A escolha do tipo de equipamento para coleta depende da capacidade financeira do município, das características, quantidades e sazonalidade com que os resíduos são gerados e das características do acesso às ruas do município pelos equipamentos de coleta (CEMPRE, 2018).

Com relação às características dos resíduos, a distinção de recicláveis e não recicláveis altera a forma da coleta. Para o caso dos resíduos não recicláveis, a coleta é feita, geralmente, com caminhões compactadores com o objetivo de aumentar a eficiência da coleta. Esse aspecto é especialmente importante, pois cerca de 60% dos custos relacionados aos RSU são da coleta dos mesmos. Para o caso dos resíduos recicláveis, a coleta é, geralmente, feita em caminhões com carroceria do tipo gaiola, de forma a preservar o resíduo para segregação e acondicionamento mais apropriado, com o objetivo de aferir ganhos na sua comercialização (CEMPRE, 2018; TCE-RS, 2019).

### **3.6.3 Destinação final de resíduos**

Segundo a PNRS, a destinação final ambientalmente adequada de resíduos tem relação com sua valoração (reutilização, reciclagem, aproveitamento energético, etc.) ou com outras destinações admitidas pelo Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) (MMA, 2016).

A reutilização compõe uma das técnicas de prevenção de resíduos que possibilita, além dos benefícios de mitigação dos impactos ambientais já mencionados, o desenvolvimento da criatividade com a concepção de diversos usos dos mesmos. As

atividades de reuso, sejam industriais ou artesanais, oferecem excelente recurso pedagógico em oficinas de educação ambiental, as quais geram oportunidades de mobilização e participação comunitárias, desenvolvendo nos cidadãos a consciência ambiental, uma atitude de responsabilidade em relação aos resíduos e ampliação dos conhecimentos na busca de soluções para sua reutilização (SILVA *et al.*, 2020).

A reciclagem é uma forma de reintrodução da matéria dos resíduos inertes ao processo produtivo, por meio de um conjunto de operações interligadas por diferentes agentes econômicos. Apesar de demandar energia no processo de transformação dos resíduos em insumos ou novos produtos, esta prática caracteriza-se como uma das soluções ecologicamente mais viáveis para redução da quantidade de resíduos, bem como para a economia de matéria-prima e de energia, despertando nas pessoas hábitos conservacionistas, além de reduzir a degradação ambiental (PAVAN, 2010).

A primeira etapa da reciclagem envolve educação ambiental para a separação dos resíduos e correto acondicionamento para subsequente transporte até as centrais de triagem e valoração, pois a mistura dos diferentes tipos de resíduos onera a reciclagem podendo inviabilizá-la (ALVES, 2017). As centrais de triagem realizam uma triagem final dos resíduos, que são separados conforme interesse de venda. Servem também como ponto de apoio para recebimento dos materiais recolhidos pela coleta de catadores de rua ou até mesmo resíduos levados pela população (TOMACHESKI, 2014).

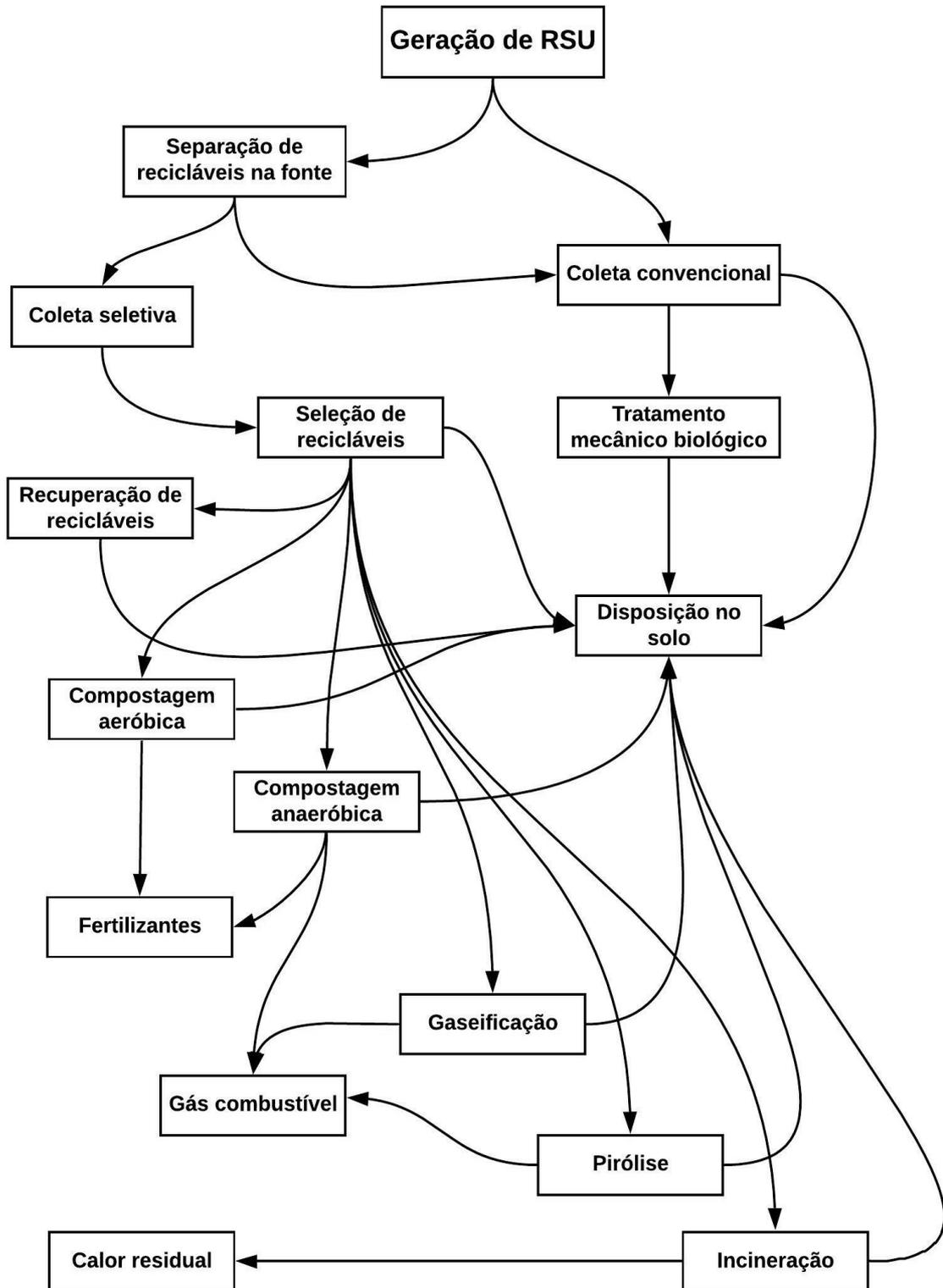
O processo de reciclagem está intrinsecamente relacionado ao princípio de conservação da massa e envolve a transformação da matéria inorgânica oriunda dos resíduos, por meio de processamento químico ou físico para o beneficiamento do material, com o objetivo de agregar valor àquela que anteriormente era classificada como resíduo. Assim, a reciclagem não proporciona a geração de energia, restringindo-se à transformação da matéria inerte dos resíduos em matéria inerte de insumos ou produtos, com enormes ganhos ambientais (SILVA, 2015).

A reciclagem dos RSU destaca-se como tecnologia de valoração que apresenta maior conservação de energia. Além disso, em seus processos de triagem, incorpora mão-de-obra pouco qualificada, possibilitando geração de riquezas em comunidades oriundas dos estratos sociais de mais baixa renda, reduzindo, por consequência, diversos problemas sociais (EPE, 2014).

Todas as tecnologias de valoração dos resíduos fazem parte de alguma forma de destinação final. Na Figura 3 são apresentadas as principais rotas tecnológicas da atualidade

para destinação final de RSU sob a luz da PNRS. Conforme se observa, em nenhuma rota tecnológica é dispensável a tecnologia de disposição no solo.

Figura 3 - Rotas tecnológicas de destinação final sob a luz da PNRS.



Fonte: Elaborado pelo Autor a partir de (ALVES, 2017).

### 3.6.4 Disposição final de rejeitos

Segundo a PNRS, a disposição final de rejeitos deve se proceder de forma ambientalmente adequada, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública, à segurança e a minimizar os impactos ambientais, consistindo, assim, na distribuição ordenada de rejeitos em aterros (BRASIL, 2010).

Conforme já mencionado, no Brasil, as três principais formas de disposição final dos RSU são aterro sanitário, aterro controlado e lixão ou vazadouro. Apesar de aterros controlados e lixões ainda serem usados para disposição final, essa é uma prática que não deve ser ampliada, mas ser erradicada, conforme preconizado pela legislação vigente.

A PNRS, em 2010, estabeleceu prazo até o final de 2014 para extinção dos lixões e aterros controlados. Em 2015, com base no Censo de 2010 e considerando o fato de que diversas municipalidades ainda não haviam estruturado aterros sanitários para disposição final, o Senado Federal estendeu o prazo para 2019 aos municípios de fronteira e os que contam com mais de 100 mil habitantes. Para os municípios entre 50 e 100 mil habitantes, o prazo foi para 2020 e para 2021 os municípios com menos de 50 mil habitantes. Em 2020, por meio da Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, que atualiza o marco legal do saneamento básico, os prazos foram reprogramados para:

- I - até 2 de agosto de 2021, para capitais de Estados e Municípios integrantes de Região Metropolitana (RM) ou de Região Integrada de Desenvolvimento (Ride) de capitais;
- II - até 2 de agosto de 2022, para Municípios com população superior a 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010, bem como para Municípios cuja mancha urbana da sede municipal esteja situada a menos de 20 (vinte) quilômetros da fronteira com países limítrofes;
- III - até 2 de agosto de 2023, para Municípios com população entre 50.000 (cinquenta mil) e 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010; e
- IV - até 2 de agosto de 2024, para Municípios com população inferior a 50.000 (cinquenta mil) habitantes no Censo 2010 (BRASIL, 2020).

A disposição de rejeitos se dá com o seu lançamento no solo, observando processos fundamentados em princípios de engenharia e regras normativas específicas em todas as fases, desde a prospecção de áreas adequadas à instalação do empreendimento, quanto na implantação, operação e monitoramento, como o objetivo de proteger o meio ambiente e a saúde pública. Em linhas gerais, a prospecção de áreas se dá por meio de estudos geológicos e topográficos para a seleção da área e a verificação do tipo de solo que confira limites de permeabilidade, adequada capacidade de suporte ao peso da massa de resíduos, de forma a se

evitar deslizamentos e a localização de jazidas de material de cobertura. A fase de prospecção visa também reduzir conflitos relacionados às áreas de preservação, áreas de sensibilidade ambiental, à proteção de corpos hídricos, à proteção de populações, problemas logísticos de transporte de resíduos, dentre outros (ABNT, 1997).

A implantação do aterro sanitário se procede com a impermeabilização do solo, a instalação de estruturas de engenharia para coleta dos líquidos percolados, condução e liberação dos gases formados durante a decomposição dos resíduos. A operação se dá com a disposição dos resíduos em camadas compactadas cobertas com solo, na forma de células, dispostas lado a lado e uma sobre a outra, conforme definido em projeto de engenharia. O monitoramento obedece a legislações e normas específicas, sendo definido, genericamente, pela União. Porém, condicionantes mais restritivas podem ser adotadas por Estados e Municípios onde os aterros sanitários estão instalados (ABNT, 1997).

No Quadro 1 são apresentadas as principais normas para implantação de aterros sanitários.

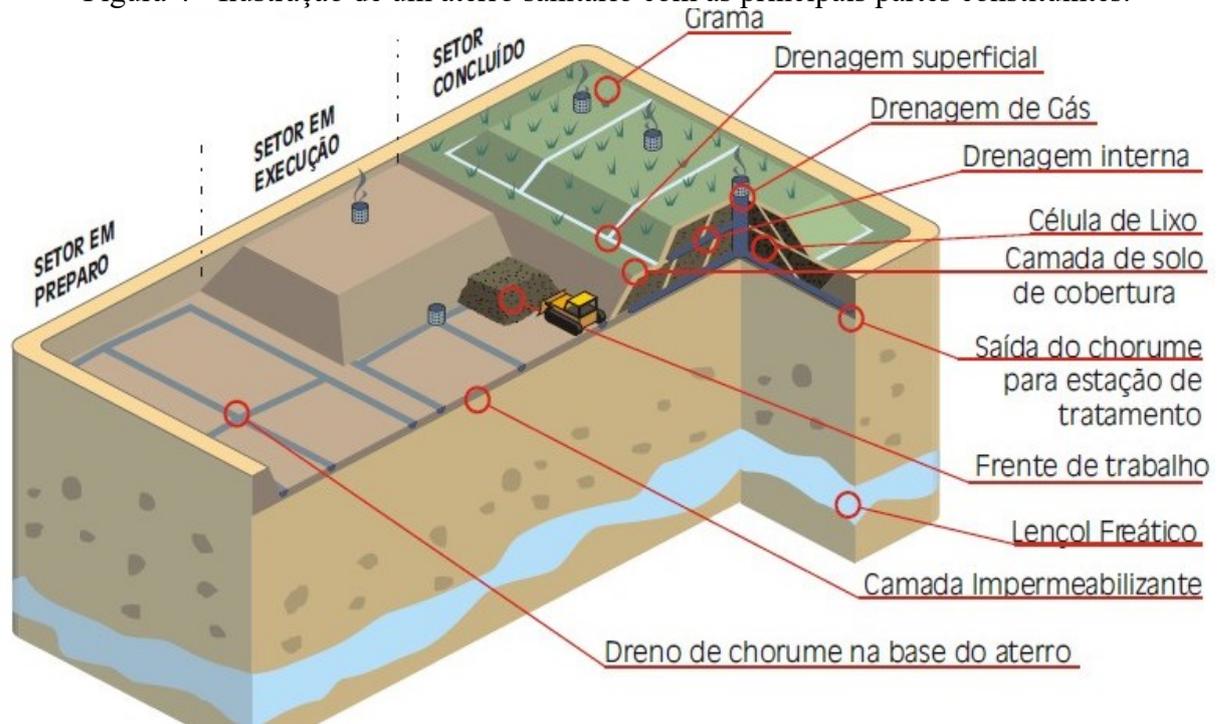
Quadro 1 - Principais normas para implantação de aterros sanitários.

<b>Normas</b>	<b>Título da Norma</b>	<b>Objetivo</b>
ABNT NBR 13.896:1997	Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação.	Esta Norma fixa as condições mínimas exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, de forma a proteger adequadamente as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, bem como os operadores destas instalações e populações vizinhas.
ABNT NBR 15.849:2010	Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento.	Esta Norma especifica os requisitos mínimos para localização, projeto, implantação, operação e encerramento de aterros sanitários de pequeno porte, para a disposição final de resíduos sólidos urbanos.
ABNT NBR 8.419:1992 Versão Corrigida:1996	Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – Procedimento.	Esta Norma fixa as condições mínimas exigíveis para a apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.

Fonte: (ABNT, 1992, 1997, 2010).

Na Figura 4 é apresentado o esquema de um aterro sanitário com as principais partes constituintes.

Figura 4 - Ilustração de um aterro sanitário com as principais partes constituintes.



Fonte: (IKEDA, 2018).

### 3.7 BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO

O biogás de aterro sanitário é resultante da atividade biológica de fermentação anaeróbica (decomposição ou mineralização da matéria orgânica sem a presença de  $O_2$ ) de dejetos animais, resíduos vegetais, lixo industrial ou residencial em condições adequadas. O biogás é composto por uma mistura de gases que tem sua concentração determinada de acordo com as características do substrato a ser degradado e com as condições físicas e químicas que influenciam no processo da biodigestão anaeróbia. O principal gás de sua composição é o gás  $CH_4$ , que, devido a sua concentração e poder calorífico, justifica a utilização do biogás como recurso energético (CGEE, 2010).

A composição dos RSU nos aterros sanitários é bastante heterogênea, pois não se trata apenas de resíduos orgânicos, mas de todo o tipo de material descartado proveniente dos centros urbanos. Assim, a composição do biogás pode variar bastante de aterro para aterro, pois a decomposição orgânica se dá numa condição não controlada (IKEDA, 2018).

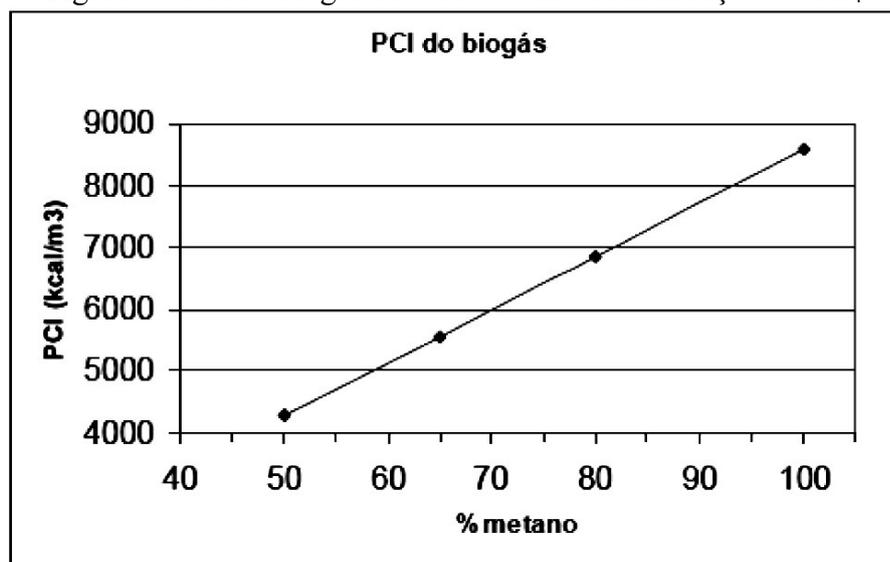
Na Tabela 2 é apresentada a composição do biogás de diferentes origens e na Figura 5 é apresentado o Poder Calorífico Inferior (PCI) do biogás com diferentes concentrações de  $CH_4$ .

Tabela 2 - Composição média do biogás de diferentes origens.

Constituinte	Gás natural	Águas Residuais	Restos de Alimentos	Dejetos Animais	Aterros
CH <sub>4</sub> (% vol.)	80-100	50-60	50-70	45-60	40-55
CO <sub>2</sub> (% vol.)	<3	30-40	25-45	35-50	35-50
N <sub>2</sub> (% vol.)	<3	<4	<4	<4	<20
O <sub>2</sub> (% vol.)	<2	<1	<1	<1	<2
H <sub>2</sub> S (ppm)	<0,1	<400	<10.000	<100	<200
Outros compostos de S (ppm)	<10	<1	<1.000	<30	<30
Halogenados (ppm)	<0,1	<0,2	<0,2	<0,2	<100
Umidade (%)	< 0,02	~ 3	~ 3	~ 3	~ 3
Siloxanos (ppm)	-	<100	-	-	<200

Fonte: (FREIRE, 2018).

Os dados da Tabela 2 demonstram que a concentração de CH<sub>4</sub> está diretamente relacionada às características do substrato. É possível inferir que, conforme se aumenta a concentração de CH<sub>4</sub>, observa-se diminuição da concentração dos demais gases que constituem o biogás.

Figura 5 - PCI do biogás de acordo com a concentração de CH<sub>4</sub>.

Fonte: (FREIRE, 2018).

O aterro sanitário é um grande reator bioquímico, cujas entradas são resíduos e água infiltrada das chuvas e as saídas, o chorume e o biogás. Os processos que ocorrem dentro desse reator podem ser divididos em cinco fases relativamente sequenciais e sob a ação de um consórcio de microrganismos estritamente anaeróbios e heterotróficos, cujo crescimento é lento. No momento em que os resíduos são depositados no aterro, as bactérias anaeróbicas não conseguem se desenvolver, devido à presença de  $O_2$  nos interstícios da massa heterogênea de resíduos, sendo que, nesta condição, os microrganismos facultativos presentes na microbiota local participam da decomposição dos resíduos (FREIRE, 2018).

As cinco fases sequenciais são divididas de acordo com a biodegradabilidade do resíduo. Os tempos de duração dessas fases dependem de diversos fatores, como tipo de resíduo, umidade, conteúdo dos nutrientes, concentração da bactéria e acidez. A seguir são detalhados os processos de cada uma das fases, conforme descrito na bibliografia (CHERNICHARO, 1997 apud COLTURATO, 2015).

**1) Hidrólise:** É a etapa inicial do processo. Os materiais particulados complexos (polímeros) são convertidos em compostos solúveis mais simples (menor massa molar), possibilitando que as bactérias fermentativas os absorvam através de suas paredes celulares. Essa dissolução ocorre por meio de enzimas extracelulares expelidas pelas bactérias. Com esse processo de hidrólise, as proteínas são convertidas em aminoácidos, os lipídeos solúveis em ácidos graxos e os carboidratos em açúcares simples.

**2) Acidogênese:** Os compostos solúveis gerados na fase de hidrólise são assimilados pelas bactérias e metabolizados, sendo convertidos, principalmente, em ácidos graxos voláteis (AGV). Em menores quantidades são gerados álcoolis, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio e novas células bacterianas.

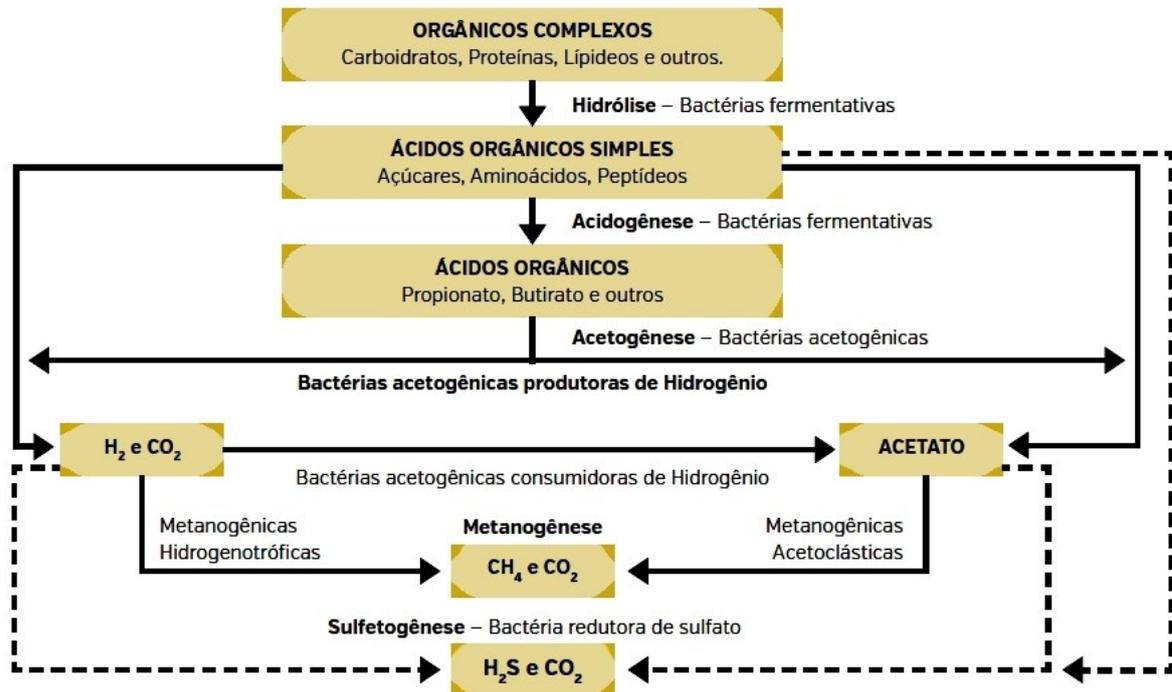
**3) Acetogênese:** Os compostos gerados na acidogênese são oxidados e convertidos a hidrogênio, dióxido de carbono e acetato, o que forma o substrato adequado ao desenvolvimento das bactérias metanogênicas.

**4) Metanogênese:** É nessa fase que os compostos orgânicos são convertidos em biogás pelas bactérias metanogênicas. As bactérias envolvidas nesse processo são divididas em dois grupos: as acetoclásticas, que produzem o metano a partir do ácido acético e de outros compostos que contêm um átomo de carbono; e as hidrogenotróficas, que metabolizam o hidrogênio e o dióxido de carbono, gerando o gás metano.

**5) Sulfetogênese:** Fase onde as bactérias sulforedutoras reduzem os sulfatos e outros compostos sulfurados em sulfetos. Essas bactérias se alimentam de uma gama de substratos, podendo competir com as demais bactérias. Essa fase pode ou não ocorrer no processo de digestão anaeróbia, e só ocorrerá de forma significativa se houver grande quantidade de sulfato presente no meio. Nesse caso, a produção de metano tende a diminuir e a de gás sulfídrico a aumentar, o que é indesejável do ponto de vista balanço energético do aproveitamento do biogás.” (CHERNICHARO, 1997 apud COLTURATO, 2015).

A Figura 6 apresenta, de forma esquemática, a sequência metabólica e os grupos microbianos no processo de digestão dos resíduos.

Figura 6 - Processos de digestão anaeróbica.



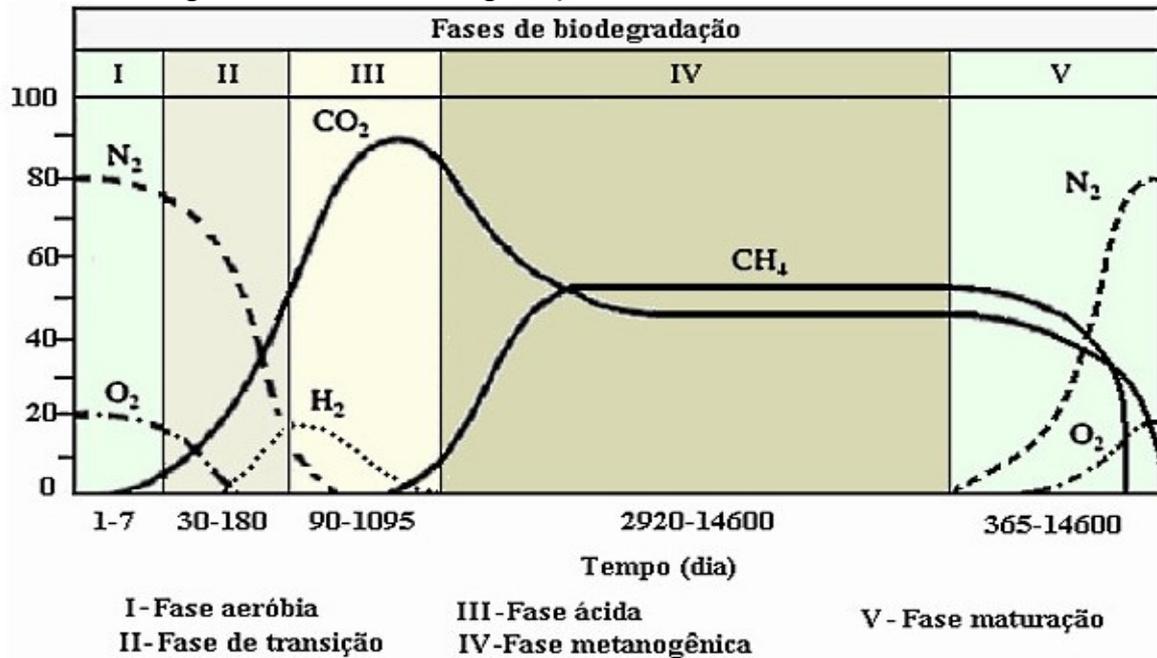
Fonte: (COLTURATO, 2015).

As cinco fases descritas podem ser resumidas em duas etapas. Na primeira ocorrem a conversão de compostos orgânicos complexos em substâncias mais simples como ácidos voláteis, hidrogênio e outros. Na segunda etapa, as substâncias obtidas na primeira fase são convertidas em biogás, com predominância do CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. Nesse sistema, a maior parte da Demanda Química de Oxigênio (DQO) é convertida em cerca de 50 a 70% de CH<sub>4</sub>. Entre 5 a 15% é convertido em lodo ou biomassa microbiana e cerca 10 a 30% não é convertida em biogás ou biomassa, permanecendo como material não degradado (CHERNICHARO, 1997 apud COLTURATO, 2015).

A divisão dos processos de digestão anaeróbica em fases é importante do ponto de vista didático para entender os mecanismos bioquímicos de estabilização da biomassa e formação do lixiviado e o biogás. Todavia, na prática, não há uma definição real dessas fases durante a operação de um aterro sanitário, pois existe grande variabilidade na idade dos materiais dispostos, sendo que resíduos antigos são sobrepostos por resíduos que acabam de chegar dos centros urbanos. Dessa forma, são encontrados, simultaneamente, microrganismos de fases diferentes metabolizando os resíduos (FREIRE, 2018).

A Figura 7 apresenta as fases de biodegradação da matéria orgânica proveniente dos resíduos no aterro sanitário em dias após a disposição.

Figura 7 - Fases de biodegradação dos resíduos em aterro sanitário.



Fonte: (TCHOBANOGLIOUS *et al*, 1993 *apud* REGATTIERI, 2009).

A descrição de cada uma das fases presentes na Figura 7 é apresentada, como se segue:

**Fase I (aeróbia):** a decomposição biológica da matéria orgânica ocorre principalmente em condições aeróbias devido à presença de certa quantidade de ar no interior do aterro. A principal fonte de microrganismos para a decomposição aeróbia nessa fase é a terra, que é usada como material de cobertura para divisão das células do aterro e como camada final;

**Fase II (transição):** a quantidade de oxigênio decai e as reações anaeróbias se desenvolvem. Os microrganismos responsáveis pela conversão da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono iniciam a conversão do material orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários. Nesta fase, o pH do chorume começa a cair devido à presença de ácidos orgânicos e pelo efeito das elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> dentro do aterro;

**Fase III (ácida):** as reações iniciadas na fase de transição são aceleradas com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e quantidades menores de gás hidrogênio. O dióxido de carbono é o principal gás gerado durante esta fase e os microrganismos envolvidos nesta conversão, descritos como não metanogênicos, são constituídos por bactérias anaeróbias estritas e facultativas. As demandas bioquímica (DBO) e química de oxigênio (DQO) e a condutividade do chorume aumentam significativamente durante esta fase devido à dissolução de ácidos orgânicos no chorume. Também devido ao baixo pH, constituintes inorgânicos como os metais pesados serão solubilizados;

**Fase IV (metanogênica):** nesta fase predominam microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente. O pH do chorume nesta fase tende ao meio mais básico, na faixa de 6,8 a 8,0;

**Fase V (maturação):** Esta fase ocorre após grande quantidade do material orgânico ter sido biodegradado e convertido em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> durante a fase metanogênica.

Como a umidade continua a migrar pela massa de resíduos, porções de material biodegradável ainda não convertidos acabam reagindo. A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta. Dependendo das medidas no fechamento do aterro, pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio podem ser encontradas no gás do aterro” (PAVAN, 2010).

### 3.8 FATORES QUE INFLUENCIAM A FORMAÇÃO DO BIOGÁS

A taxa de geração do biogás nos aterros pode ser influenciada por diversos fatores inerentes aos resíduos, mas também devido a diversos fatores externos relacionados ao ambiente, inclusive à geometria e operação do aterro (SILVESTRE, 2015).

Tais fatores precisam se encontrar em faixas ideais, de forma que a dinâmica de produção de biogás seja otimizada, pois esses fatores são intimamente ligados às funções metabólicas dos microrganismos responsáveis pela metanogênese.

No Quadro 2 são apresentados os fatores que influenciam a taxa de geração de biogás, com base em dados compilados da literatura.

Quadro 2 - Fatores que influenciam a geração de biogás nos aterros.

<b>Fator</b>	<b>Descrição e correlação</b>
Composição dos resíduos	Quanto maior a porcentagem de material orgânico no resíduo, maior o potencial de geração de CH <sub>4</sub> .
Tamanho das partículas	Quanto menor o tamanho das partículas em decomposição, maior a taxa de produção de biogás, devido a maior área de contato superficial para as reações químicas de decomposição, favorecendo sua velocidade.
Idade dos resíduos	Resíduos mais recentes elevam a possibilidade de produção de gás, sendo que os resíduos mais antigos já passaram pelos estágios de decomposição, estando, portanto, estabilizados.
pH	A faixa ideal de pH é em torno de 6,7 a 7,5, cujo intervalo é mais adequado para bactérias anaeróbicas.
Temperatura	As bactérias termofílicas favorecem a taxa de produção de gás e a temperatura ótima é entre 45°C e 65°C, mas a maior parte dos aterros ocorre na faixa das bactérias mesofílicas, cuja faixa ótima é entre 30°C e 35°C.
Ambiente anaeróbio	A produção de CH <sub>4</sub> é otimizada quando a matéria orgânica sofre decomposição em ambiente sem O <sub>2</sub> , portanto, é importante a cobertura dos resíduos com solo argiloso, de modo a criar condições anaeróbicas nas camadas inferiores.
Umidade	A umidade é essencial à vida das bactérias decompositoras. Uma umidade alta (60 a 90 %) pode aumentar a geração dos gases.
Disponibilidade de nutrientes	Cada espécie de microrganismo envolvido na decomposição anaeróbia tem sua necessidade própria de vitaminas, micro e macro nutriente para a estabilidade do processo de produção de biogás.

Fonte: (FREIRE, 2018; IKEDA, 2018; PAVAN, 2010; SILVESTRE, 2015).

### 3.9 IMPUREZAS DO BIOGÁS E FORMAS DE REMOÇÃO

Dentre todos os gases que compõem o biogás, o metano ( $\text{CH}_4$ ) é a substância, realmente, necessária como combustível, sendo que os demais gases da composição podem danificar os equipamentos de canalização e conversão energética. Dessa forma, o biogás precisa de tratamento adequado para atingir as concentrações exigidas nos diferentes sistemas de valoração energética (IKEDA, 2018).

O uso final do biogás vai determinar o tipo de tratamento que, fundamentalmente, se divide em dois tipos de sistemas: o primário e o secundário. O sistema de tratamento primário inclui a desidratação e filtração para remoção da umidade e partículas sólidas, sendo comum o uso de refrigeração e compressão do biogás. O sistema de tratamento secundário emprega tratamentos físicos e químicos para limpeza do biogás, que dependem das impurezas que devem ser removidas para a sua utilização final, com o objetivo de obtenção de elevado grau de pureza do biogás (SILVA, 2015).

O sistema primário é considerado suficiente, quando o biogás é empregado para a geração de energia por meio da queima direta em caldeiras, motores estacionários e microturbinas. Para a produção de biometano a partir do biogás visando o uso veicular ou a injeção na rede de distribuição de gás, a utilização dos sistemas primário e secundário são necessários. A definição por uma tecnologia de purificação de biogás depende da composição do mesmo, da eficiência de purificação desejada, do porte da instalação e dos custos envolvidos (COELHO *et al.*, 2018).

O projeto de limpeza e purificação do biogás é feito baseado nos aspectos que influenciam a sequência das etapas necessárias para obtenção do produto com qualidade adequada, seja para a queima direta do biogás, seja para produção de biometano. Tais aspectos estão relacionados ao consumo dos insumos (energia e materiais) de forma sustentável. A sequência das etapas para atingir tal objetivo compreende, primeiramente, na determinação das impurezas presentes no biogás bruto, seguida da escolha dos processos disponíveis para remoção das impurezas indesejáveis ao produto pretendido, pois os diferentes processos de tratamento possuem necessidades específicas de concentração de compostos (reagentes ou produtos), faixas específicas de temperatura, vazão e pressão (COELHO *et al.*, 2018).

O Quadro 3 apresenta as impurezas encontradas no biogás, seus possíveis danos e as principais técnicas de remoção, tendo como base estudos a literatura (COELHO *et al.*, 2018; FREIRE, 2018; IKEDA, 2018; PAVAN, 2010; SILVESTRE, 2015).

Quadro 3 - Impurezas do biogás, danos e técnicas de remoção.

Impureza	Danos	Técnicas de remoção
Água	Corrosão em compressores, tanques de armazenamento de gás e motores, por reações com H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> e CO <sub>2</sub> na formação de ácidos. Condensação e/ou congelamento em altas pressões.	Adsorção com sílica gel e peneira molecular. Absorção com selexol e etileno glicol. Refrigeração a 2 °C.
Condensado	Bloqueio do sistema de coleta e interrupção do processo de recuperação de energia.	Tubos inclinados para a drenagem em tanques para tratamento ou recirculação para o aterro sanitário.
Poeira	Entupimento devido à deposição em compressores e tanques de armazenamento de gás.	Lavadores Tipo Torre. Lavadores centrífugos. Lavadores Venturi.
H <sub>2</sub> S	Corrosão em compressores, tanques de armazenamento e motores. Concentrações tóxicas de H <sub>2</sub> S (> 5 cm <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) podem permanecer no biogás. SO <sub>2</sub> e SO <sub>3</sub> são formados na combustão, que são mais tóxicos e causam corrosão.	Adsorção com óxido de ferro ou carvão ativado. Absorção com água, amina ou sais alcalinos. Separação por membrana. Filtro biológico. Introdução de O <sub>2</sub> /ar no sistema de biogás.
Siloxanos	Formação de SiO <sub>2</sub> e quartzo microcristalino devido à combustão. Deposição em velas de ignição, válvulas cabeças de cilindro desgastam a superfície por abrasão.	Câmara de refrigeração. Absorção com soluções orgânicas polares, ácidos fortes e bases fortes. Adsorção com carvão ativado ou gel de sílica. Separação por membrana de fibra oca.
Compostos halogenados	Corrosão em motores de combustão.	Adsorção com carvão ativado.
CO <sub>2</sub>	Diminuição do poder calorífico do biogás.	Absorção físico/química para lavagem em coluna com água. Absorção química com soluções aquosas de aminas. Soluções de sais alcalinos como hidróxidos de sódio, cálcio ou potássio. Adsorção sobre superfície sólida com sílica, alumina, carvão ativado ou silicatos. Separação por membranas de polímeros de acetato–celulose. Separação criogênica. Conversão química (metanação). Bocal supersônico.

Fonte: (COELHO *et al.*, 2018; FREIRE, 2018; IKEDA, 2018; PAVAN, 2010; SILVESTRE, 2015).

### 3.10 EXTRAÇÃO DO BIOGÁS DOS ATERROS

Os sistemas de extração do biogás dos aterros se subdividem em dois tipos: os sistemas passivos e os ativos. Os sistemas passivos drenam os gases gerados no interior do aterro para a atmosfera, dessa forma evitam a formação de bolsões de gás e com eles os riscos de explosão, bem como a emissão de biogás descontrolada pela superfície do aterro e, com isso, mitigar os efeitos da dispersão dos gases para áreas vizinhas. Os sistemas ativos compreendem o uso de compressores e tubulações para sucção do biogás com o uso de pressões negativas, onde as tubulações devem ser impermeáveis para evitar a perda do biogás para a atmosfera e a entrada de O<sub>2</sub> no sistema (SANTO, 2013).

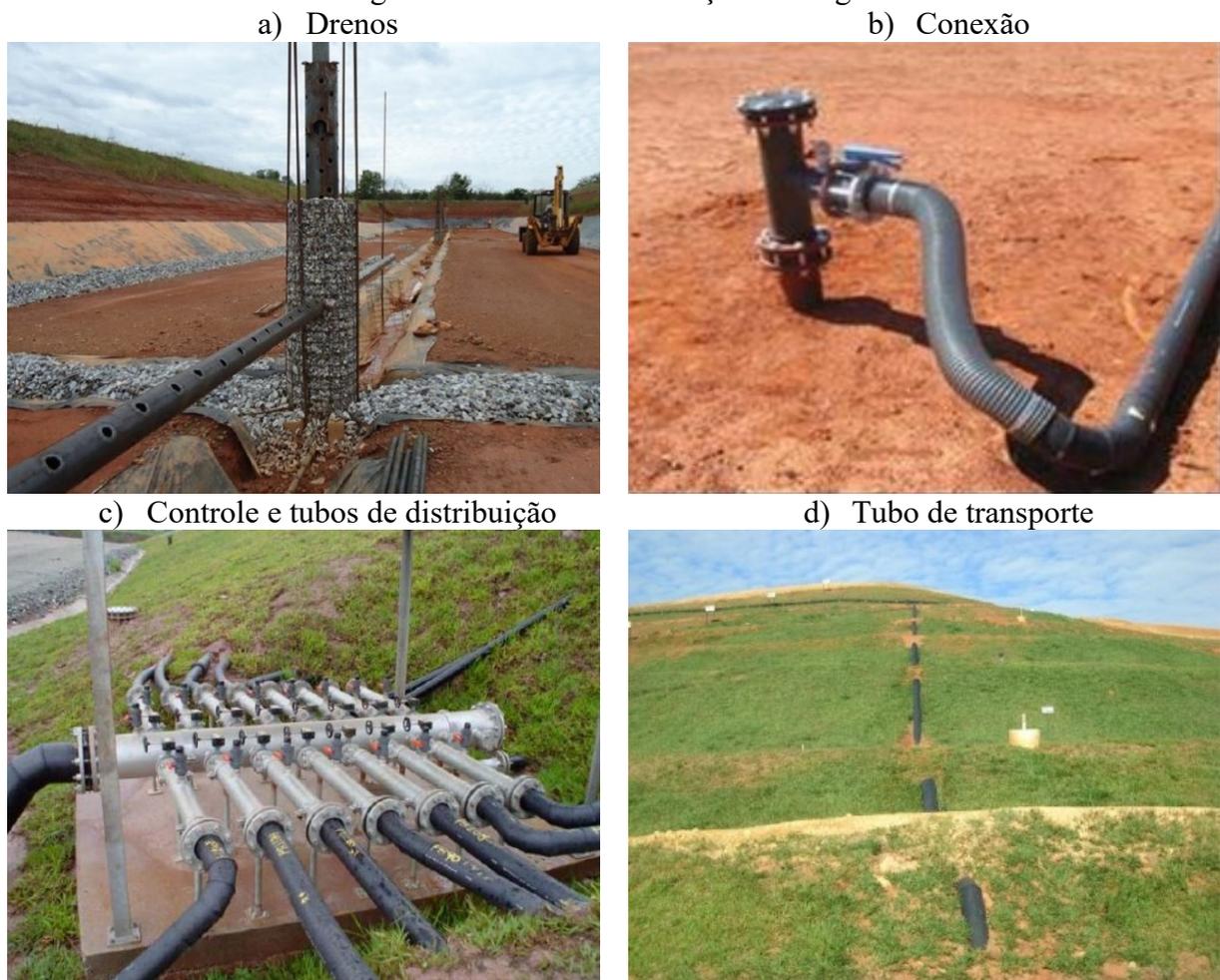
A migração de gases em aterros é afetada por três principais fatores: a difusão, a advecção e a gradientes de pressões. A difusão é uma das formas mais importantes de transporte de gases por solos não arenosos. Seu mecanismo de atuação é causado por variações nas concentrações de gases devido a movimentos brownianos das moléculas, agindo de forma a diluir a concentração e redução dos gradientes de concentrações. Ou seja, diz respeito à tendência natural de um gás de atingir uma concentração uniforme em determinado ambiente, onde o movimento cessa quando ocorre a anulação dos gradientes de concentração (FREIRE, 2018; REGATTIERI, 2009).

A advecção, também denominada de permeabilidade, ocorre devido à diferença de pressão entre dois pontos, relacionada à porosidade média de um solo. A magnitude do fluxo advectivo está associada a fatores como: sua velocidade; características gravimétricas particulares do material que influem na permeabilidade ou do meio físico que ele está sendo transportado; vazios preenchidos pelo ar ou líquidos, pois o gás pode dissolver-se em um líquido e ser transportado por ele. A advecção se refere, portanto, às áreas onde os gases encontram menor resistência para seu movimento. Os gradientes de pressão no aterro estão associados ao sentido de movimentação dos gases, que ocorrem das áreas de alta pressão para áreas de baixa pressão (FREIRE, 2018; REGATTIERI, 2009).

Um sistema de extração do biogás padrão tem quatro componentes principais: poços de coleta, tubos de transporte, compressor ou soprador e *flare* ou queimador. Os poços de coleta são constituídos por poços drenantes verticais e trincheiras horizontais. Esses elementos são interligados a um tubo de coleta que faz o transporte do biogás até a uma estação de controle com tubos de distribuição usados para controlar a perda de carga dos drenos. O poço drenante vertical consiste em um tubo de Polietileno de Alta Densidade

(PEAD) perfurado. O espaço existente entre a célula de aterro e o tubo de PEAD é preenchido com brita nº 4. As trincheiras horizontais possuem a mesma conformação dos poços drenantes verticais e servem também para drenagem dos percolados (chorume e águas pluviais) até os sistemas próprios de tratamento. As trincheiras horizontais se distribuem através das camadas de resíduos, possuindo dimensões adequadas ao transporte dos fluidos de acordo com o projeto (CEMPRE, 2018; PAVAN, 2010). A Figura 8 apresenta um exemplo de construção de drenos verticais e horizontais em aterro sanitário.

Figura 8 - Sistemas de extração de biogás.



Fonte: (PAVAN, 2010; SANTO, 2013; SOUSA, 2017).

Com base na Figura 8a, é possível notar que o sistema de drenagem forma uma estrutura tridimensional de exaustão de biogás e percolados da massa de resíduos confinada no aterro sanitário. A Figura 8b apresenta a conexão entre o poço de drenagem vertical e o tubo de coleta, sendo que essa conexão deve ser estanque para evitar vazamentos de biogás

para atmosfera. A Figura 8c apresenta a estação de controle com tubos de distribuição usados para controlar a perda de carga dos drenos.

Os tubos de transporte (Figura 8d) são constituídos de PEAD ou material similar. Eles transportam o biogás coletado de todas as estações de regulação ao redor do aterro até a estação de queima e uso energético. A produção máxima de gás de aterro a ser obtida é levada em conta para o dimensionamento da tubulação. Ao longo dos tubos de transporte, são instalados removedores de condensado em pontos de baixa elevação da tubulação (SANTO, 2013). A Figura 8d apresenta um exemplo de tubo de transporte em um aterro sanitário.

Um compressor ou soprador é necessário para puxar o gás dos poços de coleta, mas também para comprimir o gás antes de sua entrada no sistema de recuperação energética. Para retirada do biogás dos poços, a compressão requerida é geralmente baixa, sendo necessária uma pequena pressão negativa. O tamanho do compressor, o tipo e a quantidade são determinados em função de parâmetros como a taxa de compressão, o fluxo de gás e o nível desejado de compressão determinado pelo equipamento de conversão energética (PAVAN, 2010). A Figura 9 apresenta exemplos de sistemas de sucção de biogás de aterro sanitário.

Figura 9 - Sistemas de sucção de biogás de aterro sanitário.

a) Confinado



b) Não confinado



Fonte: (DIRECT INDUSTRY, 2020; SANTO, 2013).

O *flare* ou queimador consiste em um dispositivo para ignição e queima do biogás gerado no aterro. Mesmo sem fins de aproveitamento energético, a queima do biogás é importante para a oxidação do  $\text{CH}_4$  em  $\text{CO}_2$  (menos agressivo a atmosfera). No caso do aproveitamento energético do biogás, esse dispositivo é necessário para queimar o excesso de gás nas etapas de início do sistema, manutenção e *up-grade* de sistema, com a adição de um novo motor (PAVAN, 2010).

Os queimadores podem ser abertos ou fechados. Nos queimadores abertos, a combustão é incompleta e, os mesmos não possuem isolamento térmico. Os queimadores fechados ou enclausurados são constituídos de material refratário, com reguladores para controlar a entrada do ar, visor de chama e pontos para coleta de amostras (SANTO, 2013). Na Figura 10 são apresentados exemplos de queimadores abertos e fechados.

Figura 10 - Exemplos de queimadores aberto (esquerda) e fechado (direita).



Fonte: (SANTO, 2013).

### 3.11 CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA

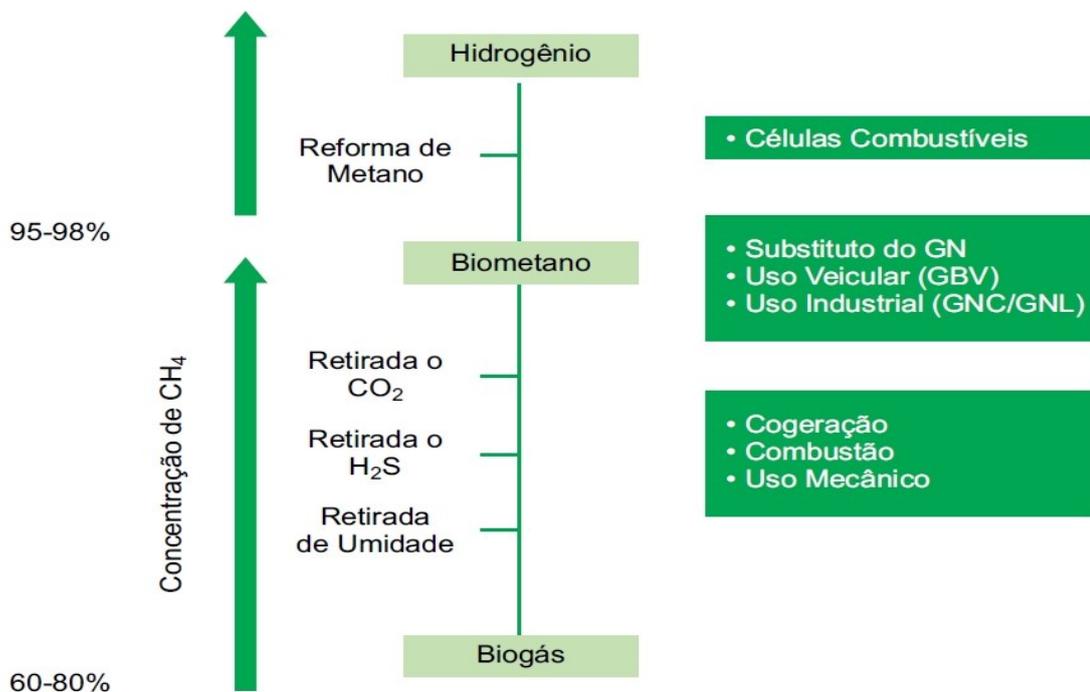
A conversão do biogás em energia consiste na conversão da energia química do gás em energia mecânica ou térmica por meio da combustão. A energia térmica pode ser aplicada em caldeiras ou fornos. A energia mecânica produzida no processo ativa um gerador, que, por sua vez, a converte em energia elétrica. O biogás é uma fonte de energia renovável, contínua e com elevado fator de capacidade (COELHO *et al.*, 2018). Também apresenta baixo custo, com menor emissão de poluentes, confere balanço de carbono negativo, geração de energia descentralizada próxima aos pontos de distribuição, com diminuição de custos e perdas na transmissão (FIGUEIREDO, 2011).

Dentre os usos para o biogás, destacam-se, também, a produção de vapor para processos industriais, secagem de grãos em propriedades rurais, secagem de lodo em estações de tratamento de esgoto, aquecimento de granjas, iluminação a gás, tratamento de chorume,

dentre outros. Para o aproveitamento do biogás em sistemas de geração de potência, as características dos sistemas de recuperação energética e as características do biogás determinarão o grau de tratamento requerido para remoção das impurezas presentes no mesmo. Um tratamento mínimo para remoção do excesso de umidade, particulados e impurezas é requerido para motores de combustão interna. Para o uso de turbinas ou microturbinas é necessário, além do tratamento mínimo, a remoção de siloxanos e sulfetos, desumidificação e filtração de particulados (SILVA, 2015).

Na Figura 11 são apresentadas as necessidades de tratamento do biogás conforme seu uso final.

Figura 11 - Tratamento do biogás conforme seu uso final.



Fonte: (COELHO *et al.*, 2018).

Dentre as tecnologias convencionais para a transformação energética do biogás, está o emprego de motor de ciclo Otto. O mesmo é também chamado de motor de ciclo aberto, devido à renovação do fluido, ou motor de quatro tempos, devido aos estágios que ocorrem na câmara de combustão (admissão, compressão, expansão e exaustão). Trata-se de uma máquina térmica, originalmente à gasolina, adaptada para operar por meio da combustão da mistura de ar e biogás, para transformar a energia química do combustível em energia mecânica. Essa adaptação consiste na modificação nos cabeçotes para instalação das velas e rebaixamentos dos pistões, redimensionamento do sistema de arrefecimento, turbina, ignição

e injeção eletrônica para cada tipo de gás utilizado como combustível, tendo em vista as diferentes concentrações dos gases que compõe o biogás gerado nos diversos aterros com as diversas tecnologias de limpeza e purificação (COELHO *et al.*, 2018; IKEDA, 2018).

Os motores de ciclo Otto realizam a injeção direta do combustível para mistura com ar, inflamando o fluido resultante por uma faísca que ocorre entre os eletrodos de uma vela de ignição. Nos motores de ciclo Diesel, o pistão comprime apenas o ar até que atinja temperatura elevada, injetando o combustível para que reaja espontaneamente com o O<sub>2</sub> do ar quente. Os motores de ciclo Diesel são mais robustos que os de ciclo Otto, pois são mais preparados para suportar maiores concentrações de enxofre (S) e, assim, são menos suscetíveis a danos provocados pela presença de ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S) (SAVI, 2019).

Os motores de ciclo Diesel funcionam de forma dual, ou seja, o combustível injetado (diesel) entra em autoignição junto com a mistura ar e biogás, possibilitando uma economia de até 80% no consumo de diesel considerando-se a configuração original do motor. Para seu funcionamento exclusivamente com biogás, o motor de ciclo Diesel deve ser convertido para ciclo Otto, sendo que essa conversão é complexa, pois envolve a substituição e introdução de diversos componentes (SOUZA, 2016). A Figura 12 apresenta um exemplo de motogerador de ciclo Otto a biogás, comercializado no Brasil.

Figura 12 - Motogerador de ciclo Otto a biogás.



Fonte: (GERMEC, 2020).

As turbinas e microturbinas também pertencem às tecnologias convencionais para a transformação energética do biogás. As mesmas são máquinas térmicas que operam segundo o ciclo Brayton, por meio da combustão do biogás e da expansão dos gases quentes para gerar energia elétrica. Esses equipamentos operam com elevada velocidade de rotação, são de fácil instalação, apresentam baixo nível de ruído e vibração. As microturbinas, especialmente, possuem dimensões reduzidas, podendo ser instaladas em módulos e em local aberto. As turbinas e microturbinas necessitam de um rígido sistema de limpeza e purificação do biogás. As emissões atmosféricas desses equipamentos são mais baixas, quando comparadas ao motor ciclo Otto e Diesel (COELHO *et al.*, 2018). Na Figura 13 são apresentados módulos em série de microturbina a biogás.

Figura 13 - Módulos de microturbina a biogás.



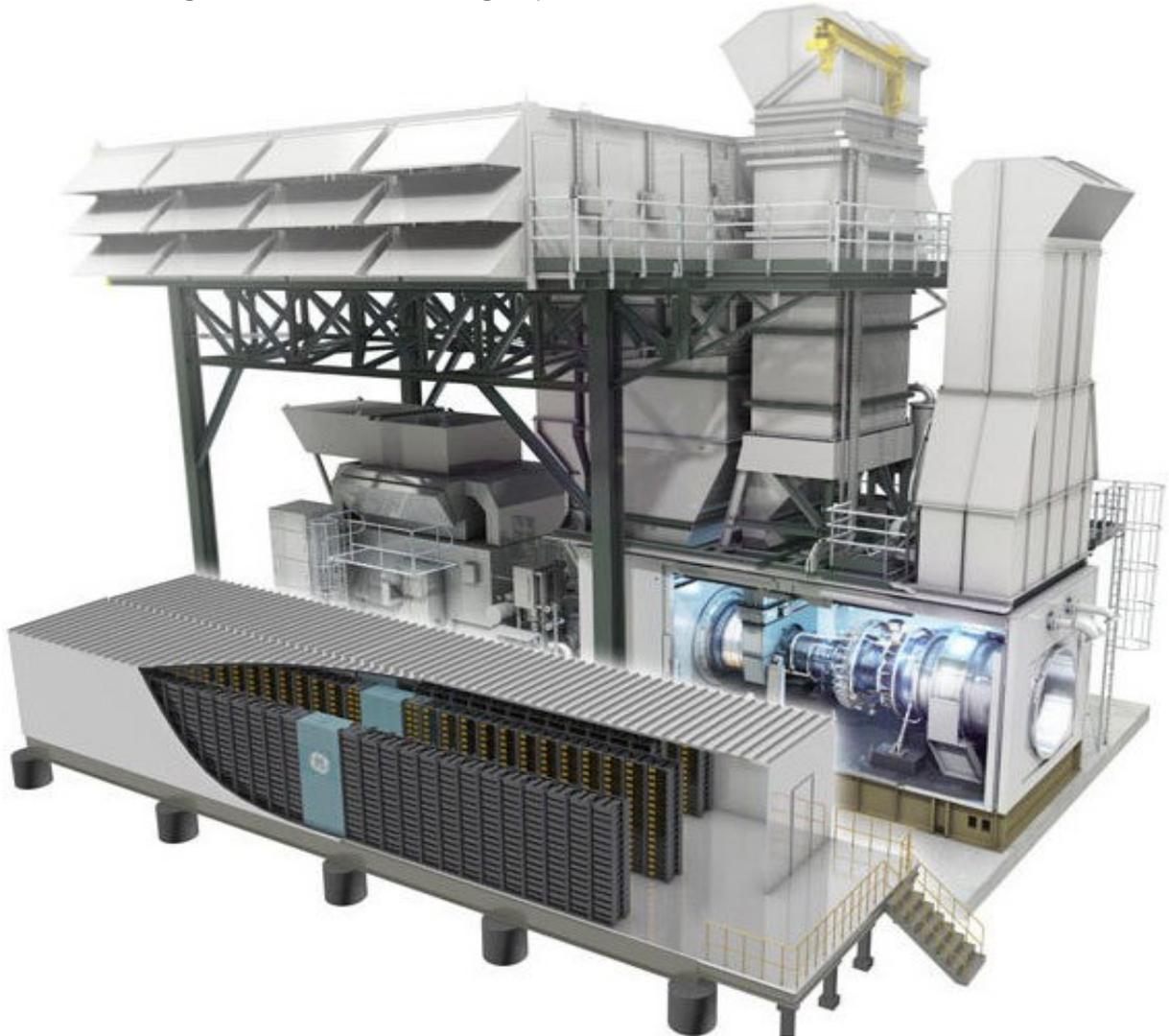
Fonte: (DIRECT INDUSTRY, 2020).

Ainda no contexto das tecnologias convencionais, os sistemas de ciclo a vapor se apresentam como uma das principais tecnologias no aproveitamento energético. Esse sistema é caracterizado pela mudança de fase do fluido de trabalho na geração de potência (denominado ciclo Rankine) (TOLMASQUIM, 2016).

O ciclo Rankine é composto de quatro etapas. Na primeira etapa, com o auxílio de uma bomba, aumenta-se a pressão do fluido de trabalho até o nível requerido para a próxima etapa. Na segunda etapa, à pressão constante, o fluido de trabalho é aquecido para passar para o estado de vapor saturado. Na terceira etapa, o vapor saturado a elevada pressão e temperatura é expandido numa turbina até valores menores de pressão e temperatura. Na quarta etapa, o fluido de trabalho passa por algum processo industrial que demande calor, por exemplo, um condensador a vácuo, e condensa à pressão constante, sendo então novamente bombeado, reiniciando o ciclo (TOLMASQUIM, 2016).

Na Figura 14 foi apresentada uma unidade de cogeração híbrida com uma turbina, que opera em ciclo Rankine, utilizada na Usina Termelétrica Juiz de Fora/MG, que pode gerar eletricidade tanto com gás natural (ou biogás purificado) como com etanol.

Figura 14 - Unidade de cogeração híbrida com turbina ciclo Rankine.



Fonte: (DIRECT INDUSTRY, 2020).

### 3.12 MODELAGEM DE GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS

O desenvolvimento de modelos experimentais para estimativa de emissões em aterros teve seu início na década de 1970, juntamente com os primeiros projetos de aproveitamento de biogás em aterros implantados nos Estados Unidos. A consideração dessa fonte alternativa de energia ocorreu num contexto de crise no fornecimento de petróleo e também para controle de GEE. Os modelos podem ter diferentes classificações, que estão baseadas nas avaliações de suas variáveis de entrada e no nível de conhecimento dos sistemas relacionados à biodegradação da biomassa no aterro sanitário (PAVAN, 2010; REGATTIERI, 2009).

O uso do biogás proveniente de aterro como fonte de energia em larga escala demanda projetos, nos quais são fundamentais as estimativas de quantidade e características do biogás em termos de composição. O principal problema no projeto e operação de um sistema de coleta de biogás para uso energético é a incerteza da taxa de geração. Assim, o desenvolvimento de modelos de geração de biogás tornou-se prioridade para a indústria de biogás. Os modelos oferecem vantagens devido aos resultados relativamente rápidos e custo-benefício satisfatório (MAJDINASAB; ZHANG; YUAN, 2017).

Os modelos de previsão de geração de biogás são, em grande maioria, definidos com base em equação de crescimento microbiano. Esse tipo de equação é aplicável apenas a uma geração equilibrada, ou seja, quando o estado de pseudo estabilidade de biodegradação é estabelecido (LIU, 2017).

As abordagens dos modelos são distintas, porém, apresentam objetivo comum, que é o de oferecer a máxima precisão para estimar a geração de biogás de aterro. Para isso, as modelagens se utilizam de modelos numéricos, equações matemáticas de diversas ordens e diversas fases de degradação da biomassa e, portanto, diversos estágios de geração de biogás.

De modo geral, os modelos utilizam parâmetros operacionais e o histórico de descarte de resíduos para prever a geração e a recuperação do biogás. Esses parâmetros de entrada das modelagens constituem o principal desafio na precisão das previsões, pois diversos fatores podem afetar a biodegradabilidade dos resíduos e, portanto, a composição e vazão de biogás.

No Quadro 4 são apresentados os diversos fatores que os modelos devem considerar para estimar a geração de biogás em aterro sanitário, conforme proposto na literatura.

Quadro 4 - Fatores que afetam a geração de biogás.

Fator	Descrição
Quantidade de resíduos e sua composição	A quantidade de resíduos está diretamente relacionada à geração de biogás em termos volumétricos. A vazão de biogás depende, da quantidade e da composição dos resíduos, que influenciam a inércia de degradabilidade da biomassa. Por questões de simplicidade, a inércia de degradabilidade é comumente segmentada pelos modelos em três níveis de degradação (alta, moderada e baixa). Por exemplo, a biomassa presente nos resíduos descartados em aterros sanitários é tipicamente composta de ligninas, celulose, hemicelulose e proteínas. As ligninas são consideradas compostos recalcitrantes em condições anaeróbicas.
Tempo	Esse fator influencia de forma crítica a viabilidade do projeto conceitual dos sistemas de aproveitamento energético do biogás de aterro. O tempo diz respeito ao período de latência anterior ao início da geração do biogás e o período de geração relativamente estável de biogás no aterro.
Teor de umidade	Existe uma faixa ótima de teor de umidade que depende das condições climáticas e da composição dos resíduos. Esse fator é satisfatoriamente alcançado com a recirculação dos lixiviados na massa de resíduos presentes nas células do aterro, que melhora as condições das bactérias anaeróbicas, diminui o tempo de latência e acelera de forma considerável a geração de biogás.
Temperatura	A atividade microbiana possibilita o aumento da produção de biogás em função do aumento da temperatura, até atingir a faixa ideal entre 30 e 40°C.
Geometria do aterro	Aterros com células de resíduos mais profundos melhoram outros fatores de desempenho de produção de biogás. Nas camadas mais baixas do aterro, o isolamento aumenta a temperatura e a profundidade aumenta o teor de umidade, melhorando as condições de biodegradabilidade da biomassa presente nos resíduos.

Fonte: (MAJDINASAB; ZHANG; YUAN, 2017).

Em linhas gerais, os modelos matemáticos para estimativa da geração de biogás em aterro sanitário foram elaborados a partir de equações matemáticas baseadas na cinética das reações bioquímicas, ajustadas sobre resultados empíricos, para calcular a taxa de produção dos gases em função do tempo de aterramento. Esses modelos podem ser analisados sob o ponto de vista de três abordagens matemáticas distintas: funções matemáticas de fatores cinéticos específicos, sendo que essas funções consideram as especificidades de degradabilidade dos diferentes constituintes da biomassa dos resíduos; funções matemáticas de fator cinético geral, as quais tratam de uma mistura de funções empíricas simples, ou de apenas uma função empírica simples, para estimativa da geração de biogás, assumindo que a biomassa que compõe os resíduos terá uma taxa de degradabilidade única para o volume considerado; modelos numéricos, que são simulações computacionais que buscam descrever o comportamento e a tendência da taxa de geração de biogás mediante a definição de parâmetros computacionais que descrevam as condições de contorno presentes no aterro (MAJDINASAB; ZHANG; YUAN, 2017).

Os modelos baseados em equações de cinética química podem se apresentar de diversas ordens, sendo que, quanto maior a ordem, maior a precisão e maior a complexidade de aplicação. Modelos de ordem zero são de aplicação simplificada, porém imprecisos, pois assumem que a taxa de geração de gás é constante no tempo. Sua aplicação deve se restringir a análises holísticas de elevada escala para arbitrar soluções que se apliquem a uma região geográfica. Modelos de primeira ordem são os mais usados por apresentar simplicidade em sua aplicação com resultados de precisão aceitáveis. Modelos de segunda ordem utilizam diversas reações complexas de primeira ordem com diferentes taxas cinéticas para explicar as complexas reações bioquímicas que ocorrem durante a degradação anaeróbia dos resíduos, elevando a complexidade dos métodos sem o proporcional ganho de precisão que justifique sua aplicação (FREIRE, 2018).

Modelos de ordem zero significam que um pequeno incremento da quantidade de biogás não influencia na taxa de decaimento da biomassa biodegradável ou da produção de biogás. Esse modelo assume que a taxa de geração do biogás é independente da quantidade de substrato remanescente ou da quantidade de biogás realmente gerada. Aterros podem apresentar produção de biogás com comportamento cinético de ordem zero, especialmente durante o período de maior atividade de geração do biogás (REGATTIERI, 2009).

Modelos cinéticos de primeira ordem consideram como fator limitante a quantidade de substrato ou a quantidade de biogás já produzido. Contudo, muitos dos fatores (conforme já descritos no Quadro 4) não são levados em conta como fatores limitantes. Geralmente, os modelos de primeira ordem restringem como fatores limitantes a quantidade de substrato, a de biogás e a umidade contida na biomassa de resíduos presentes no aterro. O fato da modelagem cinética de primeira ordem considerar a diminuição progressiva da produção de biogás ao longo do tempo parece ser suficiente para fornecer resultados com imprecisões aceitáveis, justificando a sua popularidade (REGATTIERI, 2009).

A reação de biodegradação capaz de produzir biogás pode ser representada pela Reação 1 (SILVA, 2010).



Onde:

M: massa de resíduos;

X: massa de microrganismos responsáveis pela decomposição da biomassa antes da reação de biodegradação;

G: massa de gás produzido;

N<sub>1</sub>: massa de produtos biodegradados inertes, ou seja, que não produzem mais gás;

X': massa de microrganismos responsáveis pela decomposição da biomassa depois da reação de biodegradação.

A partir da Reação 1, ao admitir  $k$  como uma constante de biodegradação [ $\text{anos}^{-1}$ ], a taxa com que a massa de resíduos varia no tempo ( $dM(t).dt^{-1}$ ) pode ser escrita na forma da Equação 1 (SILVA, 2010).

$$\frac{dM(t)}{dt} = -kM(t) \quad (1)$$

A massa de resíduos que ainda pode sofrer biodegradação no ano  $t$  é obtida com a solução da Equação 1, supondo que no ano  $t'$  tenha sido depositada a massa  $M(t')$ . Essa solução resulta na Equação 2. Na Equação 3 é definido o tempo de meia vida da massa de resíduos, sendo que esse é tempo necessário para que ocorra a degradação de 50% da massa de resíduos depositada, isto é quando  $M(t)=0,5.M(t')$  (SILVA, 2010).

$$M(t) = M(t')e^{-k(t-t')} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\ln 2}{k} \quad (3)$$

Ao interpretar  $k$  como a probabilidade de produção de biogás por unidade de tempo, pode se obter a taxa de produção de biogás por ano,  $r(t)$ , expressa em [ $\text{mol de CH}_4.\text{ano}^{-1}$ ] ou [ $\text{kg de CH}_4.\text{ano}^{-1}$ ] ou [ $\text{m}^3 \text{ de CH}_4.\text{ano}^{-1}$ ] pela Equação 4 (SILVA, 2010).

$$r(t) = kLM(t) \quad (4)$$

Onde:

L [ $\text{mol de CH}_4/\text{tonelada}$ ]: potencial de geração de biogás da massa de resíduos.

A taxa de produção de biogás no ano  $t$ , devido a uma deposição de massa  $M(t')$  de resíduos no ano  $t'$  é dada conforme a Equação 5 (SILVA, 2010).

$$r(t', t) = kLM(t')e^{-k(t-t')} \quad (5)$$

Onde:

$r(t', t)$ : taxa de produção de biogás no ano  $t$ .

A Equação 5 representa uma categoria de biodegradabilidade de primeira ordem, ou seja, a função matemática leva em conta um fator cinético geral de degradação da biomassa presente nos resíduos depositados no aterro. Essa equação é utilizada pelos modelos de previsão da geração de biogás em aterro mais usados no mundo (IPCC, Banco Mundial e LandGem) (USEPA, 2005; IPCC, 2006; THE WORLD BANK - ESMAP, 2004).

A Equação 5 é uma função *kernel* temporal que permite obter taxa de produção de gás no ano  $t$  devido à deposição de RSU em aterro durante um período de tempo anterior a  $t$ . Considerando-se a taxa de deposição de RSU no aterro sanitário,  $\dot{M}(t')$  [ $t_{RSU} \cdot \text{ano}^{-1}$ ], no instante  $t'$ , a massa depositada no intervalo de tempo  $dt'$  é expressa conforme a Equação 6 (SILVA, 2015).

$$M(t') = \dot{M}(t')dt' \quad (6)$$

Substituindo a Equação 6 na Equação 5 e integrando no intervalo de tempo em que inicia a deposição de RSU biodegradável ( $t_i$ ) até o término de sua deposição ( $t_f$ ) de uma dada porção de RSU depositada, obtém-se a taxa de produção de gás em  $t$  devido à taxa de deposição de  $\dot{M}(t')$ , conforme a Equação 7. A mesma pode ser usada para o cálculo da taxa de produção de  $\text{CH}_4$  em duas situações distintas: durante a deposição de RSU no aterro e após o encerramento da deposição (SILVA, 2015).

$$R(t) = \int_{t_i}^{t_f} kL\dot{M}(t')e^{-k(t-t')} dt' \quad (7)$$

Onde:

$R(t)$  [mol/ano]: taxa de geração total de  $\text{CH}_4$  no instante  $t$ .

Para a situação em que se deseja calcular a taxa de geração de CH<sub>4</sub> após o encerramento da deposição de RSU no aterro, a Equação 7 é resolvida considerando  $t > t_f$  para obter a Equação 8.

$$R(t) = L\dot{M}_0(t')e^{-kt}(e^{kt_f} - e^{kt_i}) \quad (8)$$

Para a situação em que se pretende calcular a taxa de produção de gás durante a deposição de RSU no aterro, a Equação 7 deve ser resolvida considerando  $t = t_f$ , obtendo-se a Equação 9.

$$R(t) = L\dot{M}_0(1 - e^{-k(t-t_i)}) \quad (9)$$

As modelagens mais usadas no mundo para previsões de produção de biogás em aterros sanitários utilizam o encadeamento matemático apresentado a partir da Reação 1, cujas variáveis são ajustadas conforme resultados empíricos para as taxas de geração de biogás encontradas nos locais onde as metodologias foram desenvolvidas.

Em todos os casos, existem erros potenciais associados à aplicação dos modelos. Esses erros estão relacionados aos ajustes empíricos, bem como aos diversos fatores que afetam a produção de biogás (conforme já apresentado no Quadro 4), operação do aterro, condições climáticas e meteorológicas, políticas públicas, regulamentações e, até mesmo, às mudanças no padrão socioeconômico da população, que podem corroborar com os erros na previsão de biogás (FREIRE, 2018; MAJDINASAB; ZHANG; YUAN, 2017; REGATTIERI, 2009; SILVA, 2015).

Contudo, os resultados obtidos por meio dos modelos matemáticos ainda são relevantes para determinar a viabilidade de projetos de aproveitamento do biogás como fonte de energia, sobretudo na apresentação de estudos para agências financiadoras. Cita-se o caso dos projetos para o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que consiste na certificação de projetos de redução de emissões para venda das RCEs a países desenvolvidos para cumprirem, de forma suplementar, suas metas de redução de GEE (MMA, 2020).

No Quadro 5 são apresentados os principais modelos matemáticos encontrados na literatura para previsão da geração de biogás em aterro sanitário, relacionados às ordens cinéticas de degradabilidade, suas equações matemáticas, suas principais vantagens e desvantagens.

Quadro 5 - Principais modelos para previsão da geração de biogás em aterro sanitário.

<b>Modelo Biogás, geração e uso energético – aterros CETESB - versão 1.0</b>	
Descrição	Programa de computador elaborado em Visual Basic, por meio da parceria entre a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA-SP) e o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). Baseado em modelo de decaimento de primeira ordem para estimar a taxa de produção de CH <sub>4</sub> em aterros sanitários.
Equação	$\sum Q_x = k \cdot \sum R_x L_0 e^{-k(x-t)}$ <p>Onde: <math>Q_x</math> é a vazão de CH<sub>4</sub> gerado no ano <math>x</math> pelo RSU depositado no ano <math>t</math>, <math>k</math> é a constante de decaimento, <math>R_x</math> é o fluxo de resíduos no ano <math>x</math>, <math>L_0</math> é o potencial de geração de CH<sub>4</sub>, <math>x</math> representa o ano em que se deseja calcular a vazão de CH<sub>4</sub> e <math>t</math> é o ano de início de deposição do resíduo no aterro.</p>
Vantagens	Produto nacional, de uso livre e fácil utilização. O programa é capaz de exportar relatório da simulação com estimativa de geração de CH <sub>4</sub> , potenciais de usos do biogás, estimativa de custos de uma planta simplificada de aproveitamento energético de gás de aterro, a quantidade de créditos de carbono e as emissões evitadas de CH <sub>4</sub> .
Desvantagens	Os custos dos equipamentos para dimensionamento do projeto simplificado e os parâmetros para estimativa de emissões evitadas de CH <sub>4</sub> estão defasados. O presente modelo usa uma versão da equação usada no modelo LandGEM, dessa forma, a oxidação parcial do CH <sub>4</sub> por meio da ação de microrganismos presentes no solo de cobertura não é levada em consideração.
<b>Modelo LandGEM</b>	
Descrição	O Modelo de Emissão de Gás de Aterro foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (USEPA). Este modelo estima a geração anual de gás com base na cinética de degradação de primeira ordem durante um período de tempo especificado.
Equação	$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-K t_{ij}}$ <p>Onde: <math>Q</math> é a taxa de geração de CH<sub>4</sub>, <math>i</math> é o incremento de tempo em um ano, <math>j</math> é o incremento de tempo igual a um décimo de um ano, <math>k</math> é a taxa de geração de CH<sub>4</sub>, <math>L_0</math> é o potencial de geração de CH<sub>4</sub>, <math>M_i</math> é a massa de resíduo depositada no ano <math>i</math>, <math>t_{ij}</math> é o intervalo de tempo <math>j</math>-ésimo décimo do ano <math>i</math>.</p>
Vantagens	Fácil aplicação e vasta literatura.
Desvantagens	O modelo não leva em consideração a oxidação parcial do CH <sub>4</sub> por meio da ação de microrganismos presentes no solo de cobertura.

Continuação do Quadro 5.

<b>Modelo IPCC</b>	
Descrição	Desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC), esse modelo fornece uma reação cinética de ordem zero com base no material degradável no resíduo, na população geradora de RSU e no fator de correção de CH <sub>4</sub> .
Equação	$E_{CH_4} = \left( MSWT \cdot MSWF \cdot MCF \cdot DOC \cdot DOCF \cdot F \cdot \frac{16}{12} - R \right) \cdot (1 - OX)$ <p>Onde: <math>E_{CH_4}</math> é a emissão de CH<sub>4</sub> dos aterros, o <math>MSWT</math> é o total de RSU depositado no aterro, o <math>MSWF</math> é a fração orgânica de RSU, o <math>MCF</math> é o fator de correção do CH<sub>4</sub> (o valor padrão do IPCC é 0,6), <math>DOC</math> é o carbono orgânico degradável (o valor padrão do IPCC é 15% em massa), <math>DOCF</math> é a fração do <math>DOC</math> realmente decomposto no resíduo (o valor padrão do IPCC é 77% em massa), <math>F</math> é a fração do CH<sub>4</sub> no gás de aterro (o padrão do IPCC é 0,5 em volume), <math>16/12</math> é o fator de conversão de <math>C</math> em CH<sub>4</sub>, <math>R</math> é o CH<sub>4</sub> recuperado e <math>OX</math> é o fator de oxidação (fração, IPCC o padrão é 0,1).</p>
Vantagens	Adaptado para quatro regiões climáticas diferentes, sendo elas: clima tropical seco, clima tropical úmido, norte seco e clima temperado e clima úmido e temperado do norte. Possui integração a programas especiais de software.
Desvantagens	Os usos de algumas fórmulas ou planilhas para a determinação de alguns parâmetros aumentam a dificuldade do uso dessa modelagem.
<b>Modelo EPER Alemanha</b>	
Descrição	Modelo de ordem zero, desenvolvido na Alemanha, com base na proporção de carbono degradável e quantidade de resíduos deposita no aterro.
Equação	$M_e = M \cdot BDC \cdot BDC_f \cdot F \cdot D \cdot C$ <p>Onde: <math>M_e</math> é a quantidade de emissão de CH<sub>4</sub> difundida, <math>M</math> é a quantidade de resíduos depositada aualmente em um aterro, <math>BDC</math> é a proporção de carbono biodegradável (o valor padrão é 0,15), <math>BDC_f</math> é a proporção de carbono biodegradável convertido em CH<sub>4</sub> (o valor padrão é 0,5), <math>F</math> é um fator de cálculo do carbono convertido em CH<sub>4</sub> (o valor padrão é 1,33), <math>D</math> é a eficiência da coleta do biogás do aterro (valores padrão de 0,1, 0,4 e 0,9). <math>C</math> é a concentração de CH<sub>4</sub> no biogás gerado no aterro (valor padrão de 0,5).</p>
Vantagens	A estimativa da geração de biogás é independente da quantidade de substrato restante ou da quantidade de biogás já gerado.
Desvantagens	Não é capaz de estimar a produção de biogás em aterros que já encerraram a deposição de resíduos.

Continuação do Quadro 5.

<b>Modelo SWANA zero ordem</b>	
Descrição	Modelo de zero ordem desenvolvido pela Associação de Resíduos Sólidos da América do Norte. Determina o potencial de geração de CH <sub>4</sub> com base no tempo.
Equação	$Q = \frac{M \cdot L_0}{t_0 - t_f}$ <p>Onde: <math>Q</math> é a vazão de CH<sub>4</sub>, <math>M</math> é a quantidade de resíduos depositado no aterro, <math>L_0</math> é o potencial de geração de CH<sub>4</sub> da massa de resíduos, <math>t_0 - t_f</math> é o período de tempo considerado.</p>
Vantagens	Simplificada aplicação
Desvantagens	Elevada imprecisão
<b>Modelo SWANA primeira ordem</b>	
Descrição	Modelo de primeira ordem desenvolvido pela Associação de Resíduos Sólidos da América do Norte. Nesse modelo, o efeito da idade do resíduo na geração de gás é utilizado para o cálculo da redução exponencial da taxa de geração de CH <sub>4</sub> .
Equação	$Q = ML_0 e^{-kt}$ <p>Onde: <math>Q</math> é a taxa de geração de CH<sub>4</sub> no período <math>t</math>, <math>M</math> é a massa de resíduos, <math>L_0</math> é o potencial de geração de CH<sub>4</sub> da massa de resíduos e <math>k</math> é uma constante para a degradação de primeira ordem.</p>
Vantagens:	Considera o efeito da idade do resíduo na geração de biogás.
Desvantagens:	Considera apenas um estágio de biodegradação.
<b>Modelo TNO</b>	
Descrição	Modelo de primeira ordem que estima a geração de CH <sub>4</sub> de acordo com a degradação do carbono orgânico dos resíduos.
Equação	$\alpha_t = \zeta \cdot 1,87 \cdot A \cdot C_0 \cdot k_1 \cdot e^{-k_1 t}$ <p>Onde: <math>\alpha_t</math> é a geração de CH<sub>4</sub> em determinado momento, <math>\zeta</math> é o fator de dissimilação (ou catabolismo) dos resíduos orgânicos (o valor padrão é 0,58), <math>A</math> é a quantidade de resíduos colocados no aterro, <math>C_0</math> é o conteúdo de carbono orgânico dos resíduos e <math>k_1</math> é a constante de degradação (valor padrão de 0,094).</p>
Vantagens	Fácil aplicação.
Desvantagens	Os dados sobre o conteúdo orgânico de resíduos não estão completos.

## Continuação do Quadro 5.

<b>Modelo GasSim</b>	
Descrição:	Modelo multifásico cinético de primeira ordem, desenvolvido pela “Golder Associates” para a Agência Ambiental da Inglaterra e País de Gales.
Equação	$L_1 = L \left[ \frac{1}{C} \right] \frac{1}{V_m} M$ <p>Onde: <math>L_1</math> é o potencial de geração de biogás, <math>V_m</math> é o volume molar em Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP) (<math>2,241 \times 10^{-2} \text{ m}^3</math>), <math>M</math> é a massa molar relativa de carbono (<math>\text{m}^3 \text{ Mg}^{-1}</math>), <math>C</math> é a concentração de <math>\text{CH}_4</math> no biogás</p>
Vantagens	Maior precisão devido aos dois estágios de biodegradação considerados
Desvantagens	O modelo é integrado a um programa proprietário, portanto com códigos protegidos e não há um conjunto completo de equações disponíveis no manual.
<b>Modelo EPER da França</b>	
Descrição	O modelo EPER faz combinação de duas aproximações para estimar a emissão de $\text{CH}_4$ em aterros sanitários, estando ou não associados a um sistema de coleta de biogás, por meio de um modelo multifásico de primeira ordem.
Equação	$FE_{CH_4} = \sum FE_0 \left( \sum A_i p_i k_i e^{-k_i t} \right)$ <p>Onde: <math>FE_{CH_4}</math> é a taxa de geração anual de <math>\text{CH}_4</math>, <math>FE_0</math> é o potencial de geração de <math>\text{CH}_4</math>, <math>p_i</math> é a fração de resíduos, <math>k_i</math> é a constante de degradação e <math>A_i</math> é o fator de normalização.</p>
Vantagens	Este modelo define três categorias de resíduos, cada uma com potencial de geração de $\text{CH}_4$ por unidade de massa de resíduos e, embora a equação apresente problemas, estes foram resolvidos na planilha do modelo.
Desvantagens	Não há correspondência entre as dimensões dos lados, esquerdo e direito da equação. O fator de normalização, apesar de definido na equação, não está incluído na planilha do modelo.
<b>Modelo Afvalzorg</b>	
Descrição	Modelo multifásico de primeira ordem, desenvolvido com base nas características dos resíduos na Holanda. Os resíduos são classificados em três categorias em termos de taxa de degradação.
Equação	$\alpha_t = \zeta \sum_{(i=1)}^3 1,87 A C_{0,i} k_{1,i} e^{-k_{1,i} t}$ <p>Onde: onde <math>\alpha_t</math> é a geração de biogás no tempo <math>t</math>, <math>\zeta</math> é o fator de dissimilação, <math>i</math> é a fração de resíduo, <math>k_{1,i}</math> é a taxa de degradação (entre 0,03 e 0,231), e <math>A</math> é a quantidade de resíduo e <math>C_{0,i}</math> é a concentração primária da fração de resíduos <math>i</math>.</p>
Vantagens	O modelo tem a capacidade de estimar a geração de biogás com base em oito categorias de resíduos e três frações, sendo cada fração relacionada com a velocidade de biodegradação e considerada separadamente para estimar a geração de biogás.
Desvantagens	O conteúdo de carbono ou dados de matéria orgânica não está disponível para algumas categorias.

Continuação do Quadro 5.

<b>Modelo LFGGEN</b>	
Descrição	Desenvolvido pela Universidade da Flórida Central (USA), este modelo multifásico de primeira ordem estima a geração de biogás com base em três estágios: i) após um curto período de latência, inicia-se o processo metanogênico; ii) a primeira fase do processo de metanogênese segue uma taxa de geração linearmente crescente e iii) a segunda fase do processo de metanogênese segue uma cinética de primeira ordem representada por uma taxa de geração exponencialmente decrescente.
Equação	$Q_s = L_0 \left[ \frac{2k}{\left( \frac{-\ln 0,01}{t_{99} - t_p} \right) (t_p - t_0)} + 2 \right]$ <p>Onde: <math>Q_s</math> é a taxa de pico de geração de <math>CH_4</math>, <math>t_0</math> é o tempo de início de biodegradação, <math>t_p</math> é o tempo em que ocorre <math>Q_s</math>, <math>t_{99}</math> é o tempo final de biodegradação, <math>k</math> é a constante de biodegradação e <math>L_0</math> é o potencial de geração de <math>CH_4</math>.</p>
Vantagens	Fácil aplicação.
Desvantagens	Os valores $k$ padrão são baseados em uma quantidade limitada de dados de apenas dois aterros. O modelo usa uma versão desatualizada da equação LandGEM.
<b>Modelo México</b>	
Descrição	Modelo de primeira ordem que estima a taxa de geração de LFG para um aterro sanitário em um determinado ano com taxa conhecida (ou estimada) de descarte de resíduos sólidos ano a ano
Equação	$Q_M = \sum_{i=1}^n 2kL_0M_i(e^{-kt})$ <p>Onde <math>Q_M</math> é a taxa de geração de <math>CH_4</math>, <math>k</math> a constante de decaimento, <math>L_0</math> é o potencial de geração de <math>CH_4</math>, <math>M_i</math> é a quantidade de resíduos depositado no aterro no ano <math>t</math>.</p>
Vantagens	Fácil aplicação.
Desvantagens	Os valores $k$ são baseados em apenas dois aterros. O modelo usa uma versão desatualizada da equação LandGEM.

Continuação do Quadro 5.

<b>Modelo Halvadakis</b>	
Descrição	Modelo matemático complexo desenvolvido com base em trabalhos anteriores no Projeto de aterro <i>Mountain View</i> , na Califórnia - USA. Baseado no crescimento biológico sequencial (cadeia alimentar microbiana), esse modelo utiliza um sistema de equações de primeira ordem para descrever um complicado ecossistema de aterro microbiano.
Vantagens	Considera a maioria das variáveis físicas, químicas e bioquímicas conhecidas que afetam a taxa de geração de gás em funções matemáticas complexas.
Desvantagens	Esse modelo ignora a quantidade de CH <sub>4</sub> gerada pela redução de CO <sub>2</sub> com hidrogênio, que constitui aproximadamente 25 a 30% do total de CH <sub>4</sub> gerado. Trata-se de um modelo matemático complexo, portanto, muito complicado para ser calibrado e aplicado.
<b>Modelo Método Residual Ponderado</b>	
Descrição	É um modelo numérico desenvolvido com base nos dados coletados e um aterro real, pode ser utilizado para todos os aterros com algumas medições de CH <sub>4</sub> .
Equação	$\iint_{\text{Domínio}} Wlp(G - \psi) dt dW = \iint_{\text{Domínio}} Amm \left( Wlp \sum Nmn \right) \leftrightarrow f1 = k_1 \sum Amn$ <p>Onde: <i>Wlp</i> é uma função de ponderação, <i>G</i> é a geração aproximada de CH<sub>4</sub>, <i>ψ</i> é uma função para cumprir a condição de limite, <i>Nmn</i> é considerado uma função de trilha que é assumida como sendo zero nos limites, <i>k<sub>1</sub></i> é a matriz do coeficiente, <i>f1</i> é a matriz desconhecida e <i>Amm</i> é um coeficiente que deve ser especificado.</p>
Vantagens	É confiável, simula e modela a maioria dos fenômenos que ocorrem durante a degradação dos resíduos e a geração de biogás.
Desvantagens:	Complexa aplicação e poucas publicações.

Fonte: (FARQUHAR; ROVERS, 1973; FREIRE, 2018; MACHADO *et al.*, 2009; MAJDINASAB; ZHANG; YUAN, 2017; PAVAN, 2010; REGATTIERI, 2009; SILVA, 2010; USEPA, 2005).

Dentre os modelos apresentados no Quadro 5, destaca-se o “Biogás, geração e uso energético - aterros CETESB - versão 1.0”, o qual está detalhado na Seção que se segue.

### 3.12.1 Modelo Biogás, geração e uso energético – aterros CETESB - versão 1.0

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA-SP) e o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) firmaram convênios (publicados no Diário Oficial da União em 26 de dezembro de 2001, seção 3, página 44). Esses convênios tiveram como objetivo a elaboração de manuais para a orientação do uso energético de biogás, fomentar a formação de centros para o desenvolvimento dessa atividade no Brasil. Além disso, foi desenvolvido o programa de

computador “Biogás”, geração e uso energético – aterros CETESB - versão 1.0”, denominado apenas de “Biogás”, para estimar a taxa de produção de CH<sub>4</sub> em aterros sanitários. Na Figura 15 é apresentada a tela inicial do programa (CETESB, 2006).

Figura 15 - Tela inicial do programa “Biogás”.



Fonte: (CETESB, 2006).

Esse programa foi escrito com o emprego da linguagem de computação Visual Basic, de uso livre, e destina-se ao público em geral devido à simplicidade de uso, assim, pesquisadores e empreendedores podem estimar as emissões de gases nos aterros, a recuperação e uso energético, possibilitando o aumento do interesse em torno desse tema (CETESB, 2006).

O programa está em sua primeira versão, dessa forma, contém erros e oportunidades de aperfeiçoamento. Por esse motivo e também pela necessidade de compartilhar com as demais instituições nacionais o conhecimento desenvolvido pelos técnicos envolvidos, optou-se por permitir o acesso ao “código fonte”. Assim, os interessados podem melhor aperfeiçoar e adaptar livremente o programa às peculiaridades de cada região ou de sua instituição. Todas as contribuições realizadas no programa devem ser remetidas para CETESB para eventual incorporação em futuras atualizações (CETESB, 2006).

O programa utiliza equação matemática com decaimento de primeira ordem, que leva em conta os processos de degradação dos RSU que ocorrem em aterros sanitários para estimar a taxa de produção de CH<sub>4</sub> por meio da Equação 10, onde, resolvendo a integral, obtém-se a Equação 11, que estima a vazão CH<sub>4</sub> no ano considerado.

$$\int \frac{dQ}{dt} = kR_x \cdot L_0 \quad (10)$$

$$Q_x = k \cdot R_x \cdot L_0 \cdot e^{-k(x-t)} \quad (11)$$

Onde:

$Q_x$  [m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>]: vazão de CH<sub>4</sub> gerado no ano  $x$  pelo RSU depositado no ano  $t$ ;

$k$  [1 ano<sup>-1</sup>]: constante de decaimento;

$R_x$  [kg<sub>RSU</sub>]: fluxo de resíduos no ano  $x$ ;

$L_0$  [m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup><sub>RSU</sub>]: potencial de geração de CH<sub>4</sub>;

$x$  [ano]: ano atual;

$t$  [ano]: ano de início de deposição do resíduo no aterro.

Da modelagem, as vazões  $Q_x$  de CH<sub>4</sub> calculadas ano a ano tem seu valor máximo no primeiro ano, reduzindo nos anos subsequentes. As vazões de CH<sub>4</sub> são maiores quanto maiores forem os valores de  $k$ ,  $R_x$  e  $L_0$ . O decaimento é representado pelo termo  $e^{-k(x-t)}$ , que será mais acentuado quanto maiores forem  $k$  e  $t$ . Assim, pode-se inferir com esse modelo que, quanto maior a idade do resíduo aterrado ( $x-t$ ), menor será o valor da vazão  $Q_x$  de CH<sub>4</sub>, pois mais acentuado será o decaimento. A estimativa de soma das vazões  $\sum Q_x$  de CH<sub>4</sub>, que representa a soma das vazões de CH<sub>4</sub> correspondentes às quantidades de resíduo depositadas no aterro ano a ano, é dada pela Equação 12 (CETESB, 2006).

$$\sum Q_x = k \cdot L_0 \cdot \sum R_x \cdot e^{-k(x-t)} \quad (12)$$

A seleção dos parâmetros  $k$  e  $L_0$  devem ser feitos de forma estratégica, pois influenciam muito na vazão de CH<sub>4</sub>. Esses parâmetros têm intrínseca relação com as diferentes taxas de decomposição dos diferentes componentes dos resíduos, que também

variam ao longo do tempo. A heterogeneidade dos resíduos aumenta sobremaneira a complexidade dessa análise, assim, o estabelecimento de faixa de degradabilidade é amplamente utilizado para facilitar a usabilidade do método (CETESB, 2006).

Diferentes faixas de degradabilidade são estabelecidas, são elas: i) faixas de componentes prontamente degradáveis normalmente incluem resíduos de alimentos e uma parte de resíduos verdes; ii) faixas de componentes moderadamente degradáveis representados por resíduos de papel e parte de resíduos verdes e iii) faixas de componentes lentamente degradáveis inclui papel revestido, madeira, têxteis e outros materiais. Plástico, vidro, metal, concreto, entulho e outros materiais inertes são normalmente considerados não biodegradáveis (MACHADO *et al.*, 2009).

A variável  $k$ , que representa a constante de decaimento da geração de  $\text{CH}_4$ , varia de 0,003-0,40  $\text{ano}^{-1}$  (IPCC, 2006). Quanto menor o valor de  $k$ , menor a estimativa de emissão de  $\text{CH}_4$  no aterro. Por outro lado, o  $k$  maior implica maior intensidade da atividade metanogênica no aterro. Valores maiores de  $k$  são esperados em clima quente e úmido, enquanto que menores valores são esperados em clima frio e seco. O potencial de geração de biogás  $L_0$  varia entre 0,001, para resíduos com pequena fração orgânica, e 0,312  $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg}_{\text{RSD}}$ , para resíduos com maior matéria orgânica (CETESB, 2006).

O programa é capaz de fornecer, como resultados, a estimativa de geração de biogás no aterro e a energia disponível para uso, mas também, o dimensionamento simplificado da implantação do projeto de uso de biogás, com detalhamento de sistemas de coleta, tratamento, compressão, gasômetro, queimador e transporte. Por fim, o programa também permite estimar eventuais ganhos com a venda de RCEs (CETESB, 2006).

Os resultados gerados pelo programa, produto do convênio firmado entre as entidades Federais e Estaduais, possibilitam aos interessados dar início ao extenso processo de obtenção dos benefícios energéticos e financeiros pela recuperação e uso energético de biogás de aterro sanitário.

### 3.13 MODELAGENS DE EMISSÕES

Conforme já mencionado, quando o biogás proveniente dos RSU é queimado em um motogerador ou expandido em uma turbina, há a geração de  $\text{CO}_2$  biogênico, o qual não contribui para o aquecimento global, além de outros poluentes atmosféricos (AYODELE; ALAO; OGUNJUYIGBE, 2020). Partindo desse pressuposto, as emissões ocorrem quando o

biogás não é queimado em *flare* ou não é aproveitado energeticamente. Assim, caracteriza-se como emissão, o biogás que escapa do aterro para a atmosfera (ALVES, 2017).

As modelagens apresentadas na Seção 3.12 aplicadas em aterros sanitários para recuperação de biogás para queima em *flare* ou para o aproveitamento energético permitem estimar a quantidade de emissões evitadas. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) recomenda o emprego do PAG para comparar os impactos das emissões de GEE, possibilitando expressar, em termos de  $\text{CO}_2_{\text{eq}}$ , todos os GEE. Por exemplo, o PAG do  $\text{CH}_4$  é 28 vezes superior ao do  $\text{CO}_2$  considerando-se um período de 100 anos (MYHRE; SHINDELL, 2013).

Todos os sistemas de extração do biogás dos aterros possuem uma eficiência de extração associada, isso significa que uma parcela de biogás acaba escapando das tubulações de extração ou da superfície do aterro para atmosfera, devendo ser contabilizada como emissões de GEE. Essas emissões, comumente chamadas de emissões fugitivas, são determinantes na avaliação do empreendimento e no controle ambiental da área do aterro (SILVA, 2015).

Nesse contexto, o biogás não recuperado por sistemas de extração do aterro, ou que não for oxidado na cobertura do aterro por bactérias metanotróficas, será lançado na atmosfera e contribuirá para o aquecimento global. Essas emissões representam fontes globais significativas, pois a concentração de  $\text{CH}_4$  na atmosfera aumentou em cerca de 150%, comparadas a concentrações do período pré-industrial (1750) (IPCC, 2014). Em escala global, 16% das emissões antrópicas totais de GEE anuais são atribuídas ao  $\text{CH}_4$  e cerca de 8% das emissões globais anuais de  $\text{CH}_4$  são provenientes de aterros. Esses dados são motivos de grande preocupação, pois, estima-se que, anualmente, somente 12% do  $\text{CH}_4$  gerado nos aterros de todo o mundo são coletados para queima em *flare* ou para uso energético (MØNSTER; KJELDSSEN; SCHEUTZ, 2019).

Os fatores relacionados aos processos de transporte do biogás, a partir do interior do aterro até sua superfície, podem ser analisados, de modo geral, em três grupos: condições meteorológicas, condições do solo, e resíduos e condições do aterro. As condições meteorológicas têm relação com a pressão barométrica, precipitação, temperatura, direção e intensidade dos ventos. As condições do solo dizem respeito às rachaduras e fissuras no solo, permeabilidade, difusividade, porosidade, teor de umidade, conteúdo orgânico, capacidade de oxidação de  $\text{CH}_4$ . Os resíduos e condições do aterro se relacionam com a taxa de produção de biogás, obstáculos ou barreiras no interior do aterro, condições dos sistemas drenantes dos

gases, integridade dos taludes e da cobertura do aterro (MØNSTER; KJELDTSEN; SCHEUTZ, 2019).

As emissões de GEE podem ser estimadas pela diferença entre a quantidade de gases gerados no aterro, calculados por meio das diversas metodologias (conforme já descritas na seção 3.12), e a quantidade recuperada de biogás (ALVES, 2017). Contudo, uma parcela significativa de CH<sub>4</sub> é oxidada na camada de solo de cobertura do aterro. Essa parcela tem sido quantificada por meio de análises isotópicas de carbono estável, no entanto, diversos pressupostos dessa metodologia precisam ser solucionados. De forma geral, os modelos para estimativa de oxidação de CH<sub>4</sub> pela cobertura do solo do aterro, por usar em características representativas do solo, não incluem as emissões da infraestrutura do aterro, como poços de lixiviados, tornando incertas as quantidades realmente emitidas de CH<sub>4</sub> (MØNSTER; KJELDTSEN; SCHEUTZ, 2019). Em meio a essas incertezas, o IPCC estima em 10% o valor máximo de oxidação do CH<sub>4</sub> nos solos de cobertura dos aterros sanitários (IPCC, 2006).

Estudos realizados para a Agência Ambiental Francesa, em termos de balanço total de CH<sub>4</sub> em três locais de aterro, com diferentes geometrias, materiais de cobertura e métodos operacionais, encontraram variação de 4% a 50% para taxa de oxidação de CH<sub>4</sub> da cobertura em locais com emissões positivas. Os resultados dos estudos foram usados como base para a definição de valores padrão dessa agência para recuperação percentual de CH<sub>4</sub>. Os valores propostos foram: 35% para uma célula operacional com um sistema de recuperação ativo de gás de aterro sanitário; 65% para uma célula com um sistema de recuperação de gás ativo e cobertura temporária; 85% para uma célula com um sistema de recuperação de gás ativo e cobertura final de argila; 90% para uma célula com cobertura final de geomembrana e recuperação ativa (SPOKAS *et al.*, 2006).

Estimativas mais precisas das parcelas de CH<sub>4</sub> que, realmente, se tornarão emissões podem ser feitas por meio de métodos de medição. Os principais métodos são: placa de fluxo dinâmico, placa de fluxo estático e análises por sistema infravermelho (REGATTIERI, 2009).

As metodologias baseadas nas medições de emissões de CH<sub>4</sub> enfrentam diversos desafios que afetam, sobremaneira, a precisão dos resultados. Esses desafios estão relacionados às grandes variações espaciais e temporais da própria geração de CH<sub>4</sub> no aterro, às mudanças nas condições atmosféricas relativas a variações na pressão barométrica, a velocidade e direção do vento, e à topografia do aterro. Em virtude disso, a despeito das diversas técnicas existentes, poucas estão disponíveis comercialmente e nenhuma delas

alcançou reconhecimento como método de referência internacional (MØNSTER; KJELDSSEN; SCHEUTZ, 2019).

### 3.14 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA

O conhecimento do mercado e dos fatores envolvidos para desenvolvimento da atividade ou serviço a ser oferecido possibilita verificar se o investimento a ser realizado em uma atividade específica acarretará retorno ao investidor. O mecanismo que se propõe a essa tarefa é o estudo de viabilidade econômica, que, por meio da reunião de todas as características necessárias para anteceder o eventual êxito ou fracasso de um projeto, mostra a qualidade do que é viável, com base em dados que possam ser verificados por meio de diversos indicadores de viabilidade econômico-financeira (SILVEIRA *et al.*, 2017). Esses estudos podem ser empregados para diferentes empreendimentos, incluindo os de aproveitamento de biogás gerados em aterros sanitários para fins energéticos.

Existem diversas metodologias para verificar a viabilidade econômica de um empreendimento, baseadas em técnicas financeiras e econômicas. Contudo, as mais usuais e recomendadas são as técnicas com foco no lucro e as técnicas de fluxo de caixa descontado. As técnicas com foco no lucro não consideram que o valor do dinheiro se altera com o tempo, ou seja, não consideram juros e correções monetárias. Pertence a esse grupo o Retorno Contábil sobre o Investimento (RCI) e o prazo de retorno do investimento (*Payback*). As técnicas do fluxo de caixa descontado são as mais usadas, pois consideram fluxos de caixa futuros que serão obtidos pela empresa. Fazem parte desse grupo a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Valor Presente Líquido (VLP) (DORNELAS, 2018).

O cálculo do VLP consiste na antecipação das receitas e nos custos do período de funcionamento do empreendimento, corrigidos por uma taxa de juros, conforme a Equação 13 (DEGEN, 2009).

$$VLP = -I_i + \frac{S_1}{(1-t_d)^1} + \frac{S_2}{(1-t_d)^2} + \frac{S_3}{(1-t_d)^3} + \dots$$

$$\dots + \frac{S_n}{(1-t_d)^n} + \frac{VR_n}{(1-t_d)^n} \quad (13)$$

Onde:

VLP: o valor presente líquido;

$I_i$ : o investimento inicial;

$S_{1+...+n}$ : os futuros saldos operacionais de caixa;

$n$ : o número de períodos, geralmente em anos;

$VR_n$ : o valor residual do negócio no fim do período  $n$ ;

$t_d$ : a taxa de desconto, composta da taxa de juros sem risco mais o prêmio pelo risco do negócio, correspondente a remuneração adequada para o novo negócio.

O VLP igual à zero significa que o investimento atinge a remuneração esperada para o negócio, pois a taxa de desconto requerida pelo risco do negócio é igual à remuneração do investimento. Para VLP maior que zero, a remuneração é maior que a taxa de desconto requerida pelo risco do negócio, portanto, o negócio possibilita aumento do patrimônio em relação ao montante do valor presente líquido do investimento. O VLP menor que zero indica que a remuneração pelo investimento não atinge a remuneração esperada, pois a remuneração é menor que a taxa de desconto requerida pelo risco do negócio. Para esse caso, o investimento é inviável (DEGEN, 2009).

A TIR determina a remuneração ou a taxa de retorno do investimento de um novo negócio, é, portanto, um complemento ao cálculo do VLP. A TIR é calculada com a solução de  $t_d$ , assumindo que  $t_d$  é a TIR, na Equação 13, quando a VLP é igual à zero. A TIR calculada para o fluxo de caixa futuro pode ser comparada com uma taxa de desconto apropriada para o negócio (DEGEN, 2009).

O Tempo para recuperação do investimento ou *Payback* é calculado pela Equação 14 e baseia-se na projeção do fluxo de caixa do novo negócio. O mesmo permite verificar o período em que os investimentos estarão expostos aos riscos, porém, esse indicador possui a deficiência de não levar em consideração o valor dos negócios após o tempo para a recuperação dos investimentos e, por isso, deve ser utilizado juntamente com os demais indicadores apresentados (DEGEN, 2009).

$$T_{RI} = \frac{I_T}{S_{OM}} \quad (14)$$

Onde:

$T_{RI}$ : o tempo para recuperação do investimento ou *Payback*;

$I_T$ : o investimento total ou a máxima necessidade de investimento e

$S_{OM}$ : o saldo operacional de caixa médio, que é calculado como a média dos saldos operacionais de caixa  $S_{1+\dots+N}$ , estimados para N períodos.

Um método especialmente utilizado no setor energético, consagrado internacionalmente e capaz de comparar diferentes tecnologias que utilizam fontes diversas que geram potenciais diferentes, é o Custo Nivelado de Energia (LCOE), sigla em inglês para *Levelized Cost of Electricity*. Esse indicador representa a receita média por unidade de energia produzida para recuperação do investimento, pois relaciona todos os custos envolvidos no ciclo de vida da planta de geração de energia por kWh. O LCOE é calculado conforme Equação 15 (IEA, 2020).

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + O\&M_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}} \quad (15)$$

Onde:

LCOE: o custo nivelado de energia [US\$/kWh];

t: o tempo de operação da instalação [anos];

I: o investimento e reinvestimento [US\$];

O&M: o custo de operação e manutenção [US\$];

E: a energia gerada [kWh] e

i: a taxa mínima de atratividade.

Os indicadores apresentados são os mais usados para estudo da viabilidade econômica e financeira de projetos. A especificidade do negócio deve ser levada em conta para ajuste fino das peculiaridades do empreendimento. Para o negócio de aproveitamento energético do biogás gerado em aterro sanitário, a configuração do mercado, bem como os regulamentos e normas do setor conferem a esse negócio características únicas. Assim, importa a esse tipo de empreendimento, o conhecimento da Resolução Normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2012) e sua revisão, e a Resolução Normativa nº 687/2015 (ANEEL, 2015), que estabelecem as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica. Além disso, é importante conhecer a estrutura tarifária definida pela Agência Nacional de

Energia Elétrica (ANEEL) e as características da concessionária de energia (SILVA *et al.*, 2017; SOUZA *et al.*, 2019).

Por fim, com base nas informações obtidas nesses estudos, é possível realizar análises comparativas entre o consumo e a produção de energia elétrica, bem como os cálculos de estimativa do capital a ser investido e do Tempo de Retorno do Capital (*Payback*) decorrente do aproveitamento energético do biogás em aterro.

## 4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica dos conhecimentos relacionados à presente pesquisa. Em seguida, foram estudadas as principais informações a respeito da área de estudo. As frações presentes nos RSU de Xangri-Lá/RS foram identificadas por meio da análise gravimétrica. As quantidades de RSU depositadas no aterro sanitário foram estimadas para o período de 2022 até 2042. A vazão de CH<sub>4</sub> foi estimada por meio do uso de modelo matemático baseado em reações cinéticas de decaimento de primeira ordem com sazonalidade anual e mensal para o período de 2022 até 2062. O planejamento energético foi feito com o uso do Método Escalonado para Motorização, proposto por Santos (2015), para periodicidade anual de vazões de CH<sub>4</sub>, e do “Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal”, proposto pelo autor deste trabalho, para periodicidade mensal. As emissões evitadas de CO<sub>2eq</sub> foram calculadas para o período de estudo desta pesquisa. Por fim, foram realizados estudos de viabilidade econômica e financeira em diversos cenários de geração de energia elétrica. As etapas mencionadas estão detalhadas nas seções subsequentes.

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

O município de Xangri-Lá/RS está situado no litoral norte do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 16) e abrange uma área de 60,5 km<sup>2</sup>. O mesmo possui população residente estimada em 16.408 habitantes na baixa temporada de turismo de litoral (março a novembro), sendo que na alta temporada de turismo de litoral (dezembro, janeiro e fevereiro) a população residente, somada à população flutuante, pode chegar a 36.004 habitantes (FEE, 2018).

De acordo com as categorias climáticas de Köppen, o município é caracterizado como Clima subtropical úmido (Cfa), com verões quentes. O sistema de classificação do clima de Köppen é amplamente utilizado para classificação do clima no mundo, e baseia-se na temperatura, precipitação e vegetação. Seu uso permite subdividir o clima terrestre em cinco tipos principais (climas úmidos tropicais, clima seco, climas de latitude média úmida com invernos suaves, climas de latitude média úmida com invernos frios e clima Polar) (ALVARES *et al.*, 2013).

A temperatura apresenta grande variação histórica ao longo do ano, sendo a média anual entre 14 °C e 22 °C, podendo alcançar a máxima de 40 °C no verão. A precipitação

pluviométrica é bem distribuída ao longo do ano, com acumulados anuais que variam de 1.000 mm a mais de 2.000 mm (PESSOA, 2017).

Figura 16 - Localização da área de estudo.



Fonte: Base do Google Maps (2019), adaptado pelo Autor do trabalho.

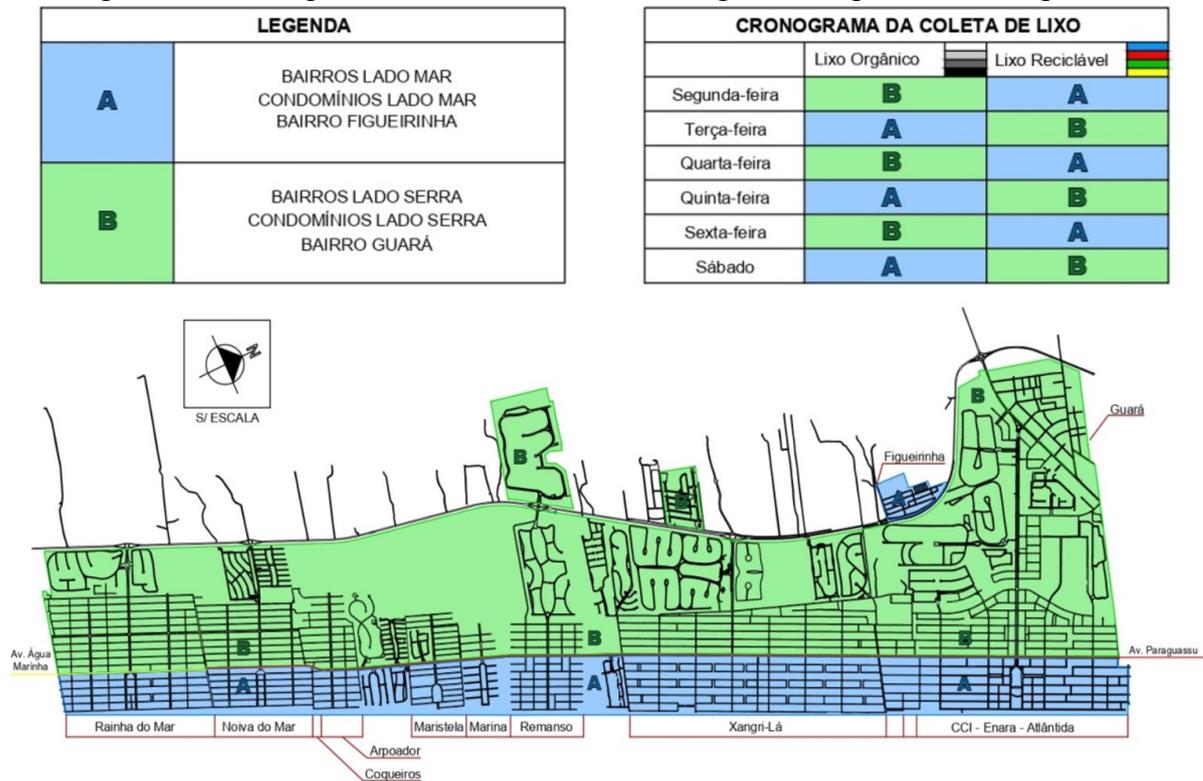
O município apresenta uma espacialidade marcada pela segmentação da área urbana no sentido longitudinal, paralelo à faixa de areia de suas praias. Essa segmentação se dá no eixo viário denominado de Avenida Paraguassu, que divide o município em duas áreas: lado serra e lado mar. O lado serra compreende os bairros e condomínios localizados entre a Avenida Paraguassu e o limite oeste do município, em direção à serra continental. Essa região abriga, principalmente, a população residente e influencia diretamente na produção continuada de RSU. O lado mar compreende os bairros e condomínios localizados entre a Avenida Paraguassu e o mar. Esta área é caracterizada por abrigar, principalmente, a população flutuante de veranistas, conferindo sazonalidade expressiva, em termos numéricos, na produção de resíduos.

A principal atividade econômica do município é a construção civil, seguida do turismo na alta temporada na estação de verão. Os seus principais problemas estão relacionados ao uso e ocupação desordenados do meio físico, contaminação do lençol freático

por esgotos domésticos em virtude da incipiente rede coletora, ausência de áreas para disposição final de RSU, bem como assoreamento de dunas e da faixa de areia da praia, em decorrência de problemas de drenagem urbana (COREDE LITORAL, 2017; JUNGBLUT; PINTO, 1995).

No município são realizados dois sistemas de coleta dos RSU, quais sejam, o convencional, no qual os resíduos são transportados em caminhões compactadores, e o seletivo de resíduos recicláveis, feito por caminhão “baú” ou “gaiola”. A Figura 17 apresenta o cronograma da coleta de RSU de Xangri-Lá/RS para baixa temporada.

Figura 17 - Cronograma da coleta de RSU de Xangri-Lá/RS para baixa temporada.



Fonte: Autor do trabalho.

Da análise da Figura 17, é possível visualizar a segmentação utilizada para o gerenciamento dos resíduos pelo Poder Público Municipal, evidenciada pela diferença de cores. Na referida figura, Rainha do Mar, Noiva do Mar, Coqueiros, Arpoador, Maristela, Marina, Remanso, Xangri-Lá, Atlântida, Guará e Figueirinha são bairros do município.

O município de Xangri-Lá/RS está localizado em área sensível nos aspectos sociais e ambientais, inclusive em decorrência da grande dificuldade de licenciar áreas para aterros, além de outros fatores (FEPAM, 2000). Atualmente, o município deposita seus resíduos no

aterro municipal da cidade de Capão da Canoa/RS (Figura 18), localizado a 20 km de distância.

Figura 18 - Aterro Municipal de Capão da Canoa/RS.



Fonte: Base do Google Earth (2020), adaptado pelo Autor do trabalho.

O aterro é composto por guarita e administração, onde se localiza a balança rodoviária, central de triagem de resíduos da coleta seletiva, célula de disposição de RSU e estação de tratamento de efluentes composta de lagoa de aeração, filtro e lagoa de estabilização. A célula de disposição de resíduos possui metodologia construtiva do tipo ascendente, sendo composta por três células encerradas que foram unificadas por duas intercélulas, nas quais, apenas uma continua em operação.

A manutenção e operação são realizadas pela Prefeitura Municipal de Capão da Canoa/RS por meio de equipe própria, constituída, principalmente, por funcionários públicos do município. O aterro possui área total de 81.156,28 m<sup>2</sup>, cuja licença ambiental de operação (L.O. n° 3852/2019), vigente até 09/03/2022, permite que o empreendimento receba no máximo 90 t.dias<sup>-1</sup> de RSU provenientes, exclusivamente, dos municípios de Capão da Canoa/RS e Xangri-Lá/RS.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS RSU

Para a caracterização dos RSU do município de Xangri-Lá/RS, foram utilizados, como dados de partida, os estudos de composição gravimétrica realizados no âmbito do convênio de cooperação firmado em 2018 entre a Prefeitura Municipal de Xangri-Lá/RS e a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), no qual o proponente dessa pesquisa participou ativamente, na qualidade de funcionário público do município em estudo. Os dados gravimétricos foram obtidos por meio de amostragens dos resíduos oriundos da coleta de Xangri-Lá/RS no aterro municipal de Capão da Canoa/RS. As amostras foram coletadas nos períodos de baixa temporada de 2018 e de alta temporada de 2019, nas duas áreas (lado mar e lado serra), conforme consta no Quadro 6.

Quadro 6 - Dados de amostragem dos RSU.

Data da coleta	Temporada	Local	Bairros
13.09.2018	Baixa	Lado mar	Bairros e condomínios lado mar e bairro Figueirinha
24.10.2018	Baixa	Lado serra	Bairros e condomínios lado serra e bairro Guará
10.01.2019	Alta	Lado serra	Bairros e condomínios lado serra e bairro Guará
15.01.2019	Alta	Lado mar	Bairros e condomínios lado mar e bairro Figueirinha

Fonte: Autor do Trabalho.

Os procedimentos da amostragem (Figura 19) foram feitos conforme o preconizado pela Norma Brasileira ABNT.NBR 10.007/2004 (ABNT, 2004).

Figura 19 - Procedimentos da amostragem dos RSU.



Fonte: Autor do Trabalho.

Em cada coleta, os resíduos provenientes de Xangri-Lá/RS foram, inicialmente, dispostos na forma de pilha, em cima de uma lona plástica a fim de evitar contaminação com o solo (Figura 19A). Em seguida, 5 tonéis de 200 L foram preenchidos com amostras de resíduos extraídos de 5 pontos da pilha (1 do topo e 4 das laterais) (Figura 19B). Na sequência, o conteúdo dos 5 tonéis foi despejado sobre outra lona plástica (Figura 19C), onde os sacos foram abertos e os resíduos misturados com o auxílio de pás e enxadas (Figura 19D). Por fim, foram realizados dois quarteamentos, ambos com descarte vis-à-vis (Figuras 19E e 19F) com a finalidade de reduzir o tamanho da amostra, conforme a recomendação da Norma Brasileira ABNT.NBR 10.007/2004 (ABNT, 2004).

As amostras foram separadas, manualmente, nos seguintes componentes: matéria orgânica, plástico, vidro, papel e papelão, alumínio, metais, eletrônicos, pano, trapo, couro e borracha, madeira e isopor. Após o processo de separação, as frações foram submetidas à pesagem para determinação da composição gravimétrica, ou seja, determinação da porcentagem de cada componente em relação à massa total de resíduos amostrados. O programa de amostragem objetivou verificar se a variação da quantidade de resíduos gerados no município de Xangri-Lá/RS também poderia influenciar nos parâmetros gravimétricos.

Foram analisados os dados das quantidades mensais de resíduos coletados no município de Xangri-Lá/RS ao longo do ano de 2018 (ano em que foi realizada a análise gravimétrica). A variação sazonal ao longo dos meses foi estudada para o ano de 2018 até 2020, ano que serviu de base para cálculo da previsão de geração de RSU do município de Xangri-Lá/RS, correspondente ao período de 2022 até 2042. Esse período representa o tempo de operação da célula do aterro, obtido com base no projeto de ampliação do aterro municipal de Capão da Canoa/RS.

As quantidades de RSU previstas foram determinadas com auxílio de planilhas de cálculo do Microsoft Excel, a partir dos registros da Secretaria Municipal de Planejamento de Xangri-Lá/RS acerca das quantidades geradas de RSU no ano de 2020. As quantidades dos anos subsequentes foram calculadas, mediante aplicação de percentual de crescimento na geração de resíduos com a mesma magnitude do percentual de crescimento populacional registrado pelo IBGE, de 7% ao ano (IBGE, 2019). As quantidades de RSU calculadas para o período de 2022 até 2042 foram usadas nas etapas subsequentes deste estudo, mediante a adoção da hipótese de que haveria estabilidade nas políticas de gestão de resíduos e na atividade econômica, de forma que a geração de resíduos *per capita* não se alterasse no tempo.

### 4.3 ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RSU DE ATERRO SANITÁRIO

Para estimativa do potencial energético dos RSU, inicialmente foi estimada a vazão de  $\text{CH}_4$  gerada ao longo do tempo de deposição dos resíduos oriundos de Xangri-Lá/RS no aterro de Capão de Canoa/RS (2022 até 2042) e nos anos subsequentes ao fim da deposição, até que a atividade metanogênica se aproximasse de zero (2043 até 2062). Em seguida, a potência elétrica disponível na célula de aterro que receberão os RSU de Xangri-Lá/RS foi estimada. Foram estabelecidos três cenários para estimar a potência instalada com base no Método Escalonado para Motorização, descrito na literatura (SANTOS, 2015). Outros três cenários foram definidos para estimativa da potência instalada, com base na proposta metodológica desenvolvida na presente pesquisa. Tal metodologia, intitulada “Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal”, uniu procedimentos usados em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e no Método Escalonado para Motorização, a fim de obter a potência ótima. Essa proposta metodológica é capaz de considerar a sazonalidade na geração de resíduos com periodicidade mensal, característica marcante em aterros localizados em regiões litorâneas, conforme apresentado nas seções subsequentes.

#### 4.3.1 Vazão de $\text{CH}_4$

A vazão de  $\text{CH}_4$  foi estimada, utilizando-se o modelo matemático baseado em reações cinéticas de decaimento de primeira ordem (Equação 12), proposto, inicialmente, pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), e posteriormente usado no programa “Biogás” (CETESB, 2006).

A utilização do programa “Biogás” é justificável por se tratar de um produto nacional, criado por meio da cooperação entre a SMA-SP, o MCT e a CETESB, e possuir uso livre, instalação simplificada e fácil utilização. O desenvolvimento do programa foi baseado nas experiências de uso dos modelos de previsão da geração de biogás em aterro mais usados no mundo (IPCC, Banco Mundial e LandGEM), adaptado à realidade brasileira. O programa determina as vazões de  $\text{CH}_4$  e potencial elétrico a partir da definição dos parâmetros  $k$ ,  $L_0$  e fornecimento das quantidades de resíduos encaminhadas anualmente ao aterro.

Na Figura 20 é apresentada a tela do programa usada para inserção das quantidades de RSU calculadas com sazonalidade anual.

Figura 20 - Inserção das provisões de resíduos calculadas no programa “Biogás”.

Características do Aterro Sanitário - Cronologia do Aterro Sanitário

Cronologia do Aterro Sanitário

Ano de abertura do aterro: 2022

Ano de fechamento do aterro: 2042

Conhece o Histórico do Aterro ?

Sim

Não

Fluxo anual

Ano	Fluxo (t/ano)
2022	17978
2023	19236
2024	20583
2025	22024
2026	23565
2027	25215
2028	26980
2029	28868
2030	30889
2031	33051
2032	35365
2033	37841
2034	40489
2035	43324
2036	46356
2037	49601
2038	53073
2039	56788

Conhece os fluxos anuais de resíduos

Sim

Não

Ano: 2022

Fluxo de RSD (t/ano): 17978

Adicionar

Excluir

Limpar a tabela

Ok

Cancelar

Fonte: (CETESB, 2006).

O programa “Biogás” calcula o fluxo de resíduos anual ( $R_x$ ) que corresponde à média das quantidades de resíduos a serem encaminhados anualmente à célula de aterro pelo município de Xangri-Lá/RS, no período de 2022 até 2042.

Os parâmetros  $k$  e  $L_0$  foram definidos conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Valores sugeridos para  $L_0$  e  $k$ .

Variável	Variação	Valores sugeridos		
		Clima úmido	Clima de umidade média	Clima seco
$L_0$ ( $\text{m}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{RSU}}$ )	0 – 0,312	0,14 – 0,18	0,14 – 0,18	0,14 – 0,18
$k$ ( $\text{ano}^{-1}$ )	0,003 – 0,4	0,10 – 0,35	0,05 – 0,15	0,02 – 0,10

Fonte: (USEPA, 1996).

Para a presente pesquisa, foi utilizado  $0,35 \text{ ano}^{-1}$  para  $k$ , pois o aterro onde os RSU de Xangri-Lá/RS são encaminhados localiza-se em região de clima úmido (PESSOA, 2017). Para  $L_0$  foi utilizado  $0,18 \text{ m}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{RSU}}$ , pois a análise gravimétrica realizada em 2018 demonstrou que os resíduos de Xangri-Lá/RS possuem elevados percentuais de matéria orgânica (76,7%) e, portanto, elevado potencial para produção de  $\text{CH}_4$  (CETESB, 2006).

Na Figura 21 é apresentada a tela do programa “Biogás” para definição dos parâmetros  $k$  e  $L_0$ .

Figura 21 - Inserção dos parâmetros  $k$  e  $L_0$  no programa “Biogás”.

Dados para estimativa de geração de metano no aterro sanitário

$$\sum Q_x = k \cdot L_0 \cdot \sum (R_x \cdot e^{-k(x-T)})$$

**Dados para geração de metano**  
 Q = Vazão de metano (m³/ano)  
 k = Constante de decaimento (1/ano)  
 Lo = Potencial de geração de biogás (m³/kg)  
 Rx = Fluxo de resíduo (t/ano)  
 x = Ano atual (ano)  
 T = ano de deposição do resíduo (ano)

**Confirmação de dados**  
 k (1/ano): 0.35  
 Lo (m³ CH4/kg): 0.18  
 Fluxo médio de resíduo no período (t/ano): 22.914  
 Ok

**Potencial de geração de metano (Lo)**  
 Pouco orgânico      Muito orgânico  
 Valor sugerido  
 Lo (m³ CH4/kg) 0.18      Ok

Voltar

Fonte: (CETESB, 2006).

A periodicidade anual dos resultados fornecidos pelo programa pode levar à proposição de usina de aproveitamento energético dos gases gerados no aterro, adequada a determinados períodos do ano e inadequada a outros períodos. Essa inadequabilidade relaciona-se à grande variação sazonal da geração de resíduos ao longo dos meses do ano, em função das dinâmicas demográficas e econômicas da região litorânea em estudo. Dessa forma, foi necessário estimar as vazões de CH<sub>4</sub> e o potencial elétrico com periodicidade mensal, de forma a viabilizar a proposição de usina que melhor se ajustasse à sazonalidade imposta pela geração de resíduos, e assim, não comprometer sua eficiência de aproveitamento energético.

Devido a limitações do programa, a modelagem em periodicidade mensal foi feita com auxílio de planilhas de cálculo do Microsoft Excel, a soma das vazões mensais, totalizadas ano a ano, foram conferidas com os valores fornecidos pelo programa para certificar a consistência dos resultados. Assim, foi reproduzida no ambiente Microsoft Excel a

mesma sistemática de cálculo usada pelo programa para obtenção das vazões de CH<sub>4</sub> e potenciais elétricos na periodicidade almejada. A solução adotada foi a criação de uma matriz de equações cinéticas de decaimento de primeira ordem (Equação 12) para determinação das vazões e dos potenciais elétricos.

Na Figura 22 é apresentado um trecho da matriz usada nos cálculos de sazonalidade anual.

Figura 22 - Matriz para previsão das vazões de CH<sub>4</sub> com sazonalidade anual.

NPER		=M\$17*EXP(-\$B\$1*( \$B27-\$B\$17))																								
	A	B	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z										
1	k	0,35	[1/ano]																							
2	L <sub>0</sub>	0,18	[m <sup>3</sup> (CH <sub>4</sub> )/kg (RSU)]																							
3	a = L <sub>0</sub> *k	63	[m <sup>3</sup> (CH <sub>4</sub> )/ t(RSU)/ar																							
4	n	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25											
5	Ano	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	b =	ΣQx [m <sup>3</sup> /ano]	ΣQx Progr [m <sup>3</sup> /ano]											
6	n	Eq.	Rx*e <sup>^</sup> (-k*(x-t))										Σ(Rx.e <sup>^</sup> (-k.(x-t))	ΣQx = a*b												
17	10	2032	35365										102.537,06	6.459.834,80	6.459.830,00											
18	11	2033	24921	37841									110.097,22	6.936.124,67	6.936.120,00											
19	12	2034	17562	26666	40489								118.073,61	7.438.637,39	7.438.640,00											
20	13	2035	12376	18791	28532	43324							126.528,74	7.971.310,43	7.971.310,00											
21	14	2036	8721	13242	20106	30530	46356						135.519,62	8.537.736,16	8.537.740,00											
22	15	2037	6146	9331	14169	21514	32667	49601					145.100,33	9.141.321,03	9.141.320,00											
23	16	2038	4331	6576	9985	15161	23020	34953	53073				155.323,84	9.785.401,70	9.785.400,00											
24	17	2039	3052	4634	7036	10683	16222	24631	37400	56788			166.243,35	10.473.331,20	10.473.330,00											
25	18	2040	2151	3265	4958	7529	11431	17357	26355	40018	60764		177.913,40	11.208.544,18	11.208.540,00											
26	19	2041	1515	2301	3494	5305	8056	12232	18572	28200	42819	65017	190.390,60	11.994.607,89	11.994.610,00											
27	20	2042	=M\$17*EXP(-\$B\$1*( \$B27-\$B\$17))										8619	13088	19872	30174	45817	69568	203.734,34	12.835.263,24	12.835.260,00					
28	21	2043	753	1143	1735	2635	4000	6074	9223	14004	21264	32287	49024	143.569,16	9.044.857,13	9.044.860,00										
29	22	2044	530	805	1223	1857	2819	4280	6499	9868	14984	22752	34547	101.171,48	6.373.803,09	6.373.800,00										
30	23	2045	374	567	862	1308	1986	3016	4580	6954	10559	16033	24345	71.294,34	4.491.543,13	4.491.540,00										
31	24	2046	263	400	607	922	1400	2126	3227	4900	7441	11298	17155	50.240,27	3.165.136,95	3.165.140,00										
32	25	2047	186	282	428	650	986	1498	2274	3453	5244	7962	12089	35.403,72	2.230.434,31	2.230.430,00										
33	26	2048	131	199	302	458	695	1056	1603	2434	3695	5611	8519	24.948,58	1.571.760,49	1.571.760,00										
34	27	2049	92	140	212	323	490	744	1129	1715	2604	3954	6003	17.580,97	1.107.600,90	1.107.600,00										
35	28	2050	65	99	150	227	345	524	796	1208	1835	2786	4230	12.389,10	780.513,16	780.510,00										
36	29	2051	46	69	106	160	243	369	561	852	1293	1963	2981	8.730,45	550.018,33	550.020,00										

Fonte: Autor do trabalho.

Da análise da Figura 22, é possível observar na célula “M27”, um exemplo de equação cinética de decaimento de primeira ordem aplicada nos resíduos a serem lançados no aterro em 2032. A equação aplicada na célula “M27” determina a quantidade de resíduos remanescentes em 2042 com potencial para produção de CH<sub>4</sub> a partir da quantidade depositada no aterro em 2032 (célula “M17”). A constante “a” (célula “B3”) é resultado da multiplicação da constante de decaimento (célula “B1”) e do potencial de geração de CH<sub>4</sub> (célula “B2”), com o devido ajuste de unidades. A multiplicação da constante “a” com a variável “b” (Coluna “Y”), que representa a somatória dos resíduos remanescentes de todos os

períodos de deposição de resíduos no aterro, desde o ano de início da deposição dos resíduos (2022) até o ano de 2042 (célula “X27”), resulta na vazão de CH<sub>4</sub> para o período considerado (célula “Y27”). Esse procedimento é repetido para todos os anos em que se almeja conhecer a vazão de CH<sub>4</sub> (de 2022 até 2062). Os valores de vazão obtidos pelo programa “Biogás” (coluna “Z”) foram usados para conferir os resultados obtidos no ambiente Microsoft Excel.

Na Figura 23 é apresentado um trecho da matriz usada nos cálculos de sazonalidade mensal.

Figura 23 - Matriz para previsão das vazões de CH<sub>4</sub> com sazonalidade mensal.

IW138																	=SOMA(IV127:IV138)		
A	B	DS	DT	DU	DV	DW	DX	DY	DZ	EA	EB	EC	ED	IU	IV	IW			
4	n	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	255	256	257			
5	mês	jan/32	fev/32	mar/32	abr/32	mai/32	jun/32	jul/32	ago/32	set/32	out/32	nov/32	dez/32	$\Sigma(Rx \cdot e^{-k \cdot (x-t)})$	$\Sigma Qx$ [mês]	$\Sigma Qx$ [ano]			
6	mês	Ano	$Rx \cdot e^{-k \cdot (x-t)}$																
127	jan/32	2032	6601											19140,10863	1.205.826,84				
128	fev/32	2032		5613										16275,46887	1.025.354,54				
129	mar/32	2032			2295									6653,142011	419.147,95				
130	abr/32	2032				2377								6891,878316	434.188,33				
131	mai/32	2032					2377							6892,204815	434.208,90				
132	jun/32	2032						2544						7375,750313	464.672,27				
133	jul/32	2032							2484					7202,117973	453.733,43				
134	ago/32	2032								1510				4377,892296	275.807,21				
135	set/32	2032									1566			4539,502931	285.988,68				
136	out/32	2032										1836		5322,115279	335.293,26				
137	nov/32	2032											2221	6440,551771	405.754,76				
138	dez/32	2032												3941	11426,32704	719.858,60	6.459.835		
139	jan/33	2033	4652											20551,32737	1.294.733,62				
140	fev/33	2033		3956										17475,47494	1.100.954,92				
141	mar/33	2033			1617									7143,684611	450.052,13				
142	abr/33	2033				1675								7400,023175	466.201,46				
143	mai/33	2033					1675							7400,373747	466.223,55				
144	jun/33	2033						1793						7919,571523	498.933,01				
145	jul/33	2033							1750					7733,137102	487.187,64				
146	ago/33	2033								1064				4700,678533	296.142,75				
147	set/33	2033									1103			4874,204876	307.074,91				
148	out/33	2033										1294		5714,51999	360.014,76				
149	nov/33	2033											1565	6915,419887	435.671,45				
150	dez/33	2033												2777	12268,80119	772.934,47	6.936.125		
151	jan/34	2034	3278											22040,24286	1.388.535,30				
152	fev/34	2034		2788										18741,54914	1.180.717,60				
153	mar/34	2034			1139									7661,234766	482.657,79				
154	abr/34	2034				1180								7936,144708	499.977,12				

Fonte: Autor do trabalho.

A sistemática de cálculo apresentada na Figura 23 é análoga à calculada com sazonalidade anual (Figura 22), porém com a organização dos valores correspondentes aos resíduos remanescentes (calculados com a equação cinética de primeira ordem) distribuídos de forma a coincidir com os meses de cada ano. Os valores de vazões calculados mês a mês

(coluna “IV”) foram somados ano a ano (coluna “IW”) de forma a possibilitar a validação dos resultados obtidos com as etapas de cálculo anteriores.

#### 4.3.2 Potência e energia disponível

A vazão de CH<sub>4</sub> oriunda do aterro pode ser descrita em termos de potência máxima disponível, calculada conforme Equação 16 (CETESB, 2006).

$$P_{disp} = \frac{Q_{CH_4} * PCI * E_c * \eta}{31.536.000} \quad (16)$$

Onde:

$P_{disp}$  [kW]: potência disponível;

$Q_{CH_4}$  [m<sup>3</sup>/ano]: vazão de CH<sub>4</sub> em cada ano;

PCI: poder calorífico do CH<sub>4</sub>;

$E_c$ : eficiência da coleta de gases;

$\eta$ : eficiência do motor de combustão interna e

31.536.000: quantidade de segundos em um ano.

A Equação 16 também foi usada para cálculo da potência com sazonalidade mensal, porém, com os devidos ajustes nas unidades.

Foram adotados os parâmetros de eficiência sugeridos pelo programa “Biogás”, quais sejam: 75% para eficiência de coleta de biogás e a parcela de biogás que oxida ou escapa na cobertura do aterro; eficiência de 33% na conversão elétrica do motogerador e 35.530,00 kJ/m<sup>3</sup> para o poder calorífico do CH<sub>4</sub> (CETESB, 2006).

A energia elétrica disponível para cada ano foi calculada por meio da Equação 17.

$$E = P_{disp} * t \quad (17)$$

Onde:

$E$  [kWh]: energia elétrica disponível;

$P_{disp}$  [kW]: potência disponível e

$t$  [h]: tempo de operação da planta de aproveitamento energético em um ano.

Foi adotado o tempo de operação de 7.884 horas para o cálculo da energia elétrica disponível. Esse tempo foi determinado mediante a subtração dos tempos de parada para manutenção da planta de aproveitamento energético, correspondente a 10% do total de horas em um ano (8.760 horas) (DE BRITO, 2021).

#### 4.3.3 Potência e energia instalada

A potência instalada foi calculada por meio de duas metodologias: i) Método Escalonado para Motorização, proposto por Santos (2015), que permite determinar a potência de grupos geradores operando a plena carga, supridos exclusivamente pelo biogás gerado no aterro com periodicidade anual e ii) “Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal”, proposto no presente trabalho, o qual considera a sazonalidade na geração de resíduos ao longo dos meses do ano e sua influência na vazão de CH<sub>4</sub>.

Esse trabalho avaliou três cenários de motorização para cada metodologia. Os cenários de motorização se diferem pelo número de grupos geradores, cada um com sua potência e tempo de disponibilidade para geração de diferentes quantidades de energia. O Quadro 7 apresenta uma síntese dos principais elementos que se relacionam com cada cenário.

Quadro 7 - Cenários propostos para diferentes configurações de potência instalada.

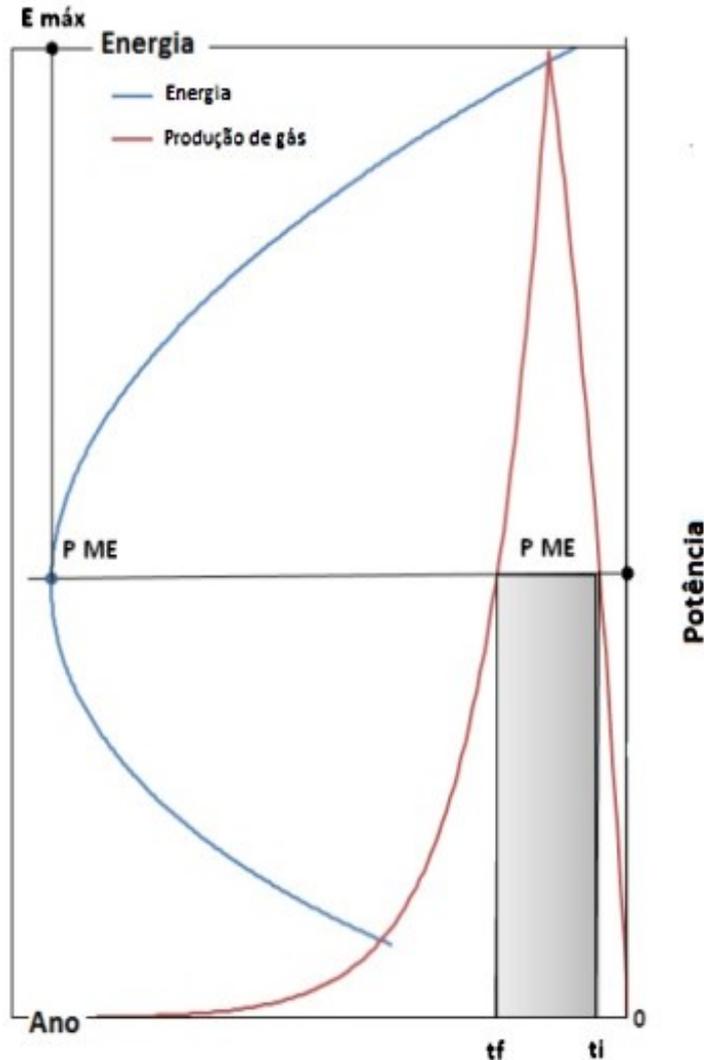
Metodologia	Cenário	Número de grupos geradores	Potências associadas
Método Escalonado para Motorização (SANTOS 2015)	C1.1	1	P1
	C1.2	2	P1 e P2
	C1.3	3	P1, P2 e P3
“Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal”	C2.1	1	P1
	C2.2	2	P1 e P2
	C2.3	3	P1, P2 e P3

Fonte: Autor do Trabalho.

O Método Escalonado para Motorização objetiva obter o máximo benefício do sistema de aproveitamento energético, mediante a aplicação de diversos grupos geradores para aproveitamento das máximas energias possíveis dentro de uma faixa de tempo relacionada a uma potência ótima.

Para o entendimento dessa metodologia é necessário à análise de uma curva típica de potência pelo tempo de um aterro sanitário, bem como sua respectiva curva de energia (Figura 24).

Figura 24 - Correspondência entre potência máxima e energia máxima.

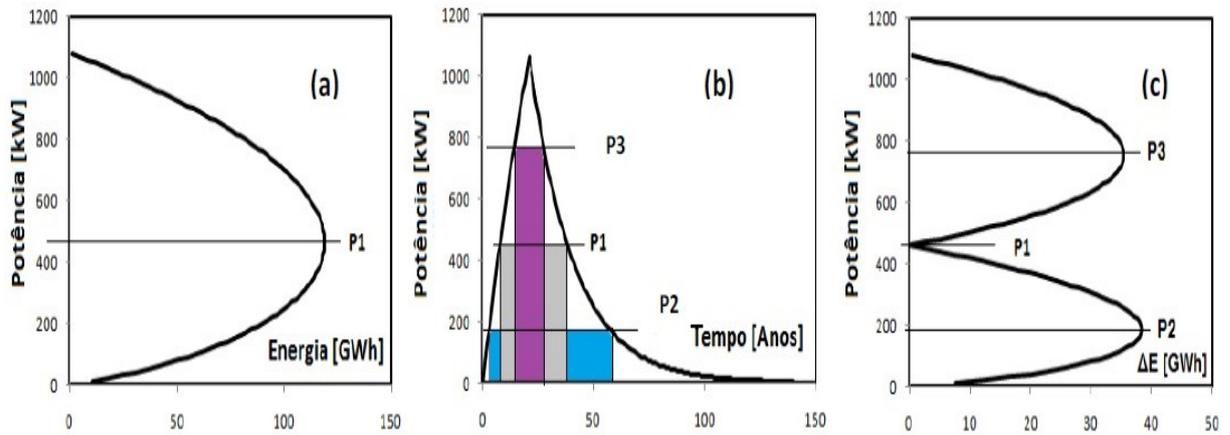


Fonte: (SANTOS, 2015).

A Figura 24 apresenta a curva típica de potência representada na cor vermelha e a curva de energia em azul. A máxima energia ( $E_{máx.}$ ) é obtida pela multiplicação da potência de máxima energia ( $P_{ME}$ ) pelo seu tempo de disponibilidade ( $t_f - t_i$ ). O tempo de disponibilidade pode ser obtido com o uso das equações que melhor representaram a curva de potência disponível da célula de aterro estudada, tomando a interseção entre cada valor de potência.

Mediante o exposto, o Método Escalonado para Motorização foi utilizado para determinação de três faixas de energia, associadas a três faixas de potência, conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Previsão de potência pelo Método Escalonado para Motorização.



a) Energia máxima correspondente a potência P1; b) Representação das potências P1, P2 e P3 na curva de produção de gás do aterro e c) Energias intermediárias correspondentes às potências P2 e P3.

Fonte: (SANTOS, 2015).

Para a presente pesquisa, a máxima produção de energia, calculada com a Equação 17, resultou na escolha da potência P1 (Figura 25a) do grupo gerador para o cenário C1.1. O grupo gerador de potência P2 foi usado para compor o cenário C1.2, assim, foi considerado um maior incremento energético associado a uma potência P2 (Figura 25c), cuja magnitude corresponda a valores menores que P1 (Figura 25b). O grupo gerador dimensionado para o cenário C1.3, buscou um incremento energético (Figura 25c) para valores de potência P3 maiores que P1 (Figura 25b).

O cálculo das energias intermediárias  $E_2$  e  $E_3$  foi feito por meio das Equações 18 e 19, respectivamente.

$$E_2 = P2. [(t_{i1} - t_{i2}) + (t_{f2} - t_{f1})] \quad (18)$$

$$E_3 = (P3 - P1). (t_{f3} - t_{f3}) \quad (19)$$

O tempo de disponibilidade  $[(t_{i1} - t_{i2}) + (t_{f2} - t_{f1})]$  corresponde ao trecho representado com cor azul da Figura 25b. O tempo de disponibilidade  $(t_{f3} - t_{i3})$  corresponde ao trecho representado na cor roxa no gráfico da mesma figura. As equações que melhor representam a curva de potência do aterro para determinação dos tempos de disponibilidades das potências foram obtidas com uso do software Microsoft Excel.

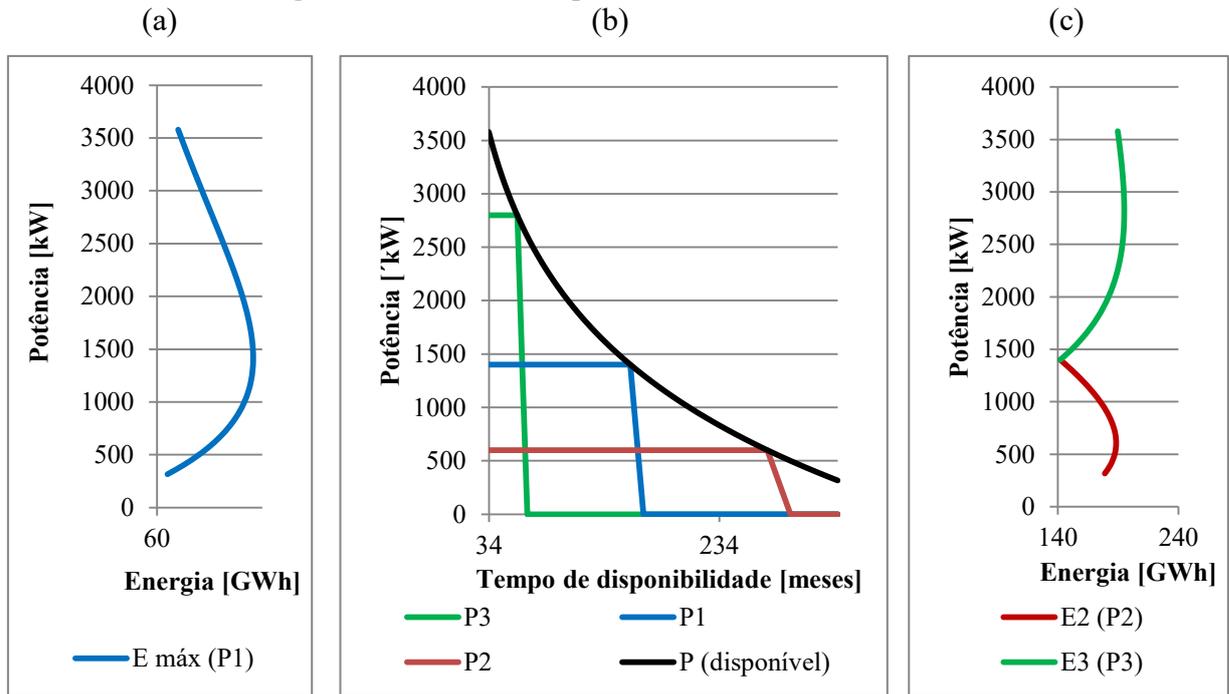
O Método Escalonado para Motorização foi desenvolvido com base na curva de “Potência X Tempo” de um aterro sanitário, com sazonalidade de tempo anual. A presente pesquisa ensejou uma análise que considerasse a sazonalidade de tempo mensal na geração de resíduos, dessa forma, foi proposto um modelo alternativo intitulado “Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal”, para viabilizar a análise.

Esse método demandou a provisão de volumes de  $\text{CH}_4$  calculados por meio da matriz de equações cinéticas de primeira ordem com sazonalidade mensal, conforme descrito na seção 4.3.1 (Vazão de  $\text{CH}_4$ ). As potências associadas as vazões mensais de  $\text{CH}_4$  foram ordenadas de forma decrescente para gerar uma curva de permanência de potência no tempo (distribuição percentual), semelhante à usada para obter a potência ótima em PCH, conforme descrito nos estudos de Silva (2012). A curva de permanência relaciona determinada potência com sua respectiva probabilidade de tempo de ocorrência, ou seja, o percentual de tempo que uma potência igual ou inferior estará disponível nos anos seguintes ao início da deposição dos resíduos no aterro.

De forma análoga ao método proposto por Santos (2015), com o auxílio do software Microsoft Excel, foi determinada a equação que melhor se ajustasse a curva de permanência de potência, tomando a interseção entre cada valor de potência, para determinar seus respectivos tempos de disponibilidade. De posse desses valores, um novo gráfico de “Potência X Tempo” foi gerado com sazonalidade mensal do tempo para cálculo da energia máxima e variações de energias máximas.

A aplicação do “Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal” foi feita com a proposição de três cenários (C2.1, C2.2 e C2.3) de motorização para o cálculo das potências, a fim de possibilitar a comparação com os resultados obtidos com o Método Escalonado para Motorização, conforme Figura 26.

Figura 26 - Previsão de potência em ambiente sazonal.



a) Energia máxima correspondente à potência  $P1$ ; b) Representação das potências intermediárias  $P1$ ,  $P2$  e  $P3$  na curva de permanência de potência e c) Energias intermediárias devido às potências  $P2$  e  $P3$ .

Fonte: Autor do trabalho.

A potência  $P1$  do grupo gerador para o cenário C2.1 foi determinada a partir da identificação da maior energia, de forma análoga ao Método Escalonado para Motorização, porém com o tempo de disponibilidade baseado na curva de permanência de potência com sazonalidade mensal (Figura 26a).

O cenário C2.2 foi composto por grupo gerador de potência  $P2$  que multiplicado pelo seu respectivo tempo de disponibilidade, resultou na energia  $E2$  (Figura 26c). Essa energia representa um maior incremento energético para valores de  $P2$  menores que  $P1$  (Figura 26b). O tempo de disponibilidade de  $P2$  é obtido a partir da curva de permanência, descontado o tempo de disponibilidade de  $P1$ .

O grupo gerador associado ao cenário C2.3, de potência  $P3$  maior que  $P1$  (Figura 26b), teve sua energia  $E3$  calculada por meio da multiplicação da diferença de potência ( $P3 - P1$ ) pelo tempo de disponibilidade de  $P3$  (Figura 26c).

#### 4.4 ESTIMATIVA DAS EMISSÕES EVITADAS DE CO<sub>2</sub>eq

As emissões de CO<sub>2</sub>eq evitadas com a conversão da energia térmica obtida da queima do biogás em eletricidade no sistema motogerador foram estimadas pelo programa computacional “Biogás”, o qual calcula a massa total de CH<sub>4</sub> produzida no período de operação da usina composta de sistemas de motogeradores e estima as emissões com base na relação 21 kg de CO<sub>2</sub> por 1 kg de CH<sub>4</sub>. Contudo, em detrimento da metodologia oferecida pelo programa “Biogás”, foram utilizadas, para aferição das emissões de CO<sub>2</sub>eq evitadas, relações em massa de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, mais atuais, que consideram o PAG do CH<sub>4</sub> em relação ao CO<sub>2</sub> na faixa de 28 a 36 kg de CO<sub>2</sub> por 1 kg de CH<sub>4</sub> (AYODELE; ALAO; OGUNJUYIGBE, 2020).

#### 4.5 VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA

A análise econômica e financeira foi feita para os seis cenários de potência instalada, mediante análise dos indicadores VLP e TIR calculados, conforme Equação 13, *Payback* e LOOE, calculados com as Equações 14 e 15, respectivamente, conforme seção 3.14, sendo que a taxa de atratividade considerada foi de 12% conforme Brito (2020). Para cálculo desses indicadores foi preciso determinar, para cada cenário, seu respectivo fluxo de caixa para o período de 2024 até 2047, composto pelos custos de investimento e reinvestimento, as despesas com Operação e Manutenção (O&M), as receitas do projeto e os valores de economia de energia.

O período do fluxo de caixa adotado, corresponde ao tempo máximo possível de aproveitamento energético do aterro, obtido dos métodos de previsão de potência instalada dos grupos geradores, conforme seção 4.3.3. O período de 2024 até 2047 foi usado para todos os fluxos de caixa de todos os cenários de motorização devido ao modelo de negócio, baseado em compensação de energia elétrica com a concessionária.

Inicialmente, foi definida a tecnologia de conversão térmica da energia contida no CH<sub>4</sub> em energia elétrica com base na Tabela 4. Os valores de potência obtidos conforme seção 4.3.3 suscitaram a escolha das tecnologias: conjuntos de motores-geradores padrão e pequenos conjuntos de motores-geradores alternativos.

Tabela 4 - Tipos de projetos de energia e tamanhos recomendados.

<b>Tipo de Projeto de Energia</b>	<b>Tamanho de projeto recomendado</b>
Uso direto (caldeira, estufa, etc.)	(11,33-84,95) m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> de gás
Atualização de caldeira	≤ 84,95 m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> de gás
Planta de processamento de Gás Natural Veicular	(28,32-169,90) m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> de gás
Estação de produção e abastecimento de Gás Natural Veicular no local	(1,42-17,00) m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> de gás
Conjuntos geradores de turbina padrão	> 3 MW
Conjuntos de motores-geradores padrão	≥ 800 kW
Conjuntos geradores de microturbina	(30-750) kW
Pequenos conjuntos de motores-geradores alternativos	100 kW a 1 MW
Conjuntos de motores-geradores alternativos híbridos	≥ 800 kW
Conjuntos geradores de turbina híbridos	≥ 3 MW
Conjuntos geradores de microturbinas híbridas	(30-300) kW

Fonte: (USEPA, 2021).

Os diferentes arranjos de potência dos grupos geradores de cada um dos cenários, ensejaram composições de valores distintos de custos de investimento e O&M, que foram calculados de acordo com as diretrizes da última atualização do sistema *LFGcost-Web* desenvolvido pela USEPA (USEPA, 2021).

Para o cálculo dos custos de investimento, foram considerados os custos com sistema de coleta e queima do biogás, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Custos de investimento com sistemas de controle e queima.

<b>Descrição</b>	<b>Método</b>
Mobilização da equipe de perfuração e tubulação	US\$20.000
Custo de capital instalado de poços verticais de extração de gás	US\$4.675 x número de poços
Custo de capital instalado de cabeças de poço e sistema de coleta de tubos	US\$17.000 x número de poços
Custo de capital instalado de soprador e flare	$(0,028 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1})^{0,61} \times \text{US\$ } 4.600$
Engenharia, licenciamento e levantamento	US\$700 x número de drenos

Fonte: (USEPA, 2021).

O cálculo do número de drenos foi feito conforme Equação 20.

$$N_D = \frac{A_A}{\pi * R^2} \quad (20)$$

Onde:

$N_D$ : número de drenos;

$A_A$  [ $m^2$ ]: área do aterro;

$R$  [m]: raio de influência de cada dreno.

O valor adotado para o raio de influência do dreno foi de 20 m e a área do aterro foi calculada, conforme Equação 21 (BARRAK, 2018).

$$A_A = MD_{RSU} * 560 \quad (21)$$

Onde:

$MD_{RSU}$  [t]: quantidade de resíduos encaminhada diariamente ao aterro;

560: fator que se baseia em parâmetros utilizados em projetos de aterro com 20 anos de vida útil, 20 metros de altura do aterro, talude 1:3 e 80% do terreno ocupado com a área operacional.

Os custos dos investimentos para cada grupo gerador foram baseados nos dados da Tabela 6.

Tabela 6 - Método para cálculo dos custos de investimento com grupos de geradores.

<b>Tecnologia de conversão</b>	<b>Método</b>
Pequenos conjuntos de motores-geradores alternativos	US\$2.300 x capacidade [kW]
Conjuntos de motores-geradores padrão	[(US\$1.300 x capacidade [kW]) + US\$1.100.000] + US\$250.000 para interconexão

Fonte: (USEPA, 2021).

Os custos de O&M para os sistemas de controle e queima do biogás e para os grupos geradores foram calculados, conforme Tabela 7 e 8, respectivamente.

Tabela 7 - Custo de O&amp;M para os sistemas de controle e queima.

<b>Descrição</b>	<b>Método</b>
Custo anual de O&M	US\$2.600 x número de drenos + US\$5.100 para o queimador
Uso de eletricidade por sopradores	$5,66 \cdot 10^{-5} \text{ kWh.m}^{-3}$

Fonte: (USEPA, 2021).

O volume de gás considerado para estimativa do uso de eletricidade foi baseado no volume médio de gás gerado pelo aterro para um período de 24 anos (2024 até 2047). Esse período corresponde ao intervalo tempo definido para os fluxos de caixa usados na análise econômica e financeira. O queimador previsto foi do tipo enclausurado, com capacidade de suprir as necessidades de queima de excedentes de todo volume de gás produzido no aterro.

Tabela 8 - Custos de O&amp;M para os grupos de geradores.

<b>Tecnologia de conversão</b>	<b>Método</b>
Pequenos conjuntos de motores-geradores alternativos	US\$0,024 x kWh gerado/ano
Conjuntos de motores-geradores padrão	US\$0,025 x kWh gerado/ano

Fonte: (USEPA, 2021).

Conforme informações do manual do sistema *LFGcost-Web* (USEPA, 2021), os parâmetros apresentados nas Tabelas 5, 6, 7 e 8 são referentes ao ano de 2013. Dessa forma, os mesmos foram corrigidos para o ano de 2021 a partir das médias anuais da inflação dos Estados Unidos no período de defasagem, conforme Equação 22 (DEGEN, 2009).

$$IC = \sum_{i=1}^n (1 + i_t)^n \quad (22)$$

Onde:

IC: índice de correção;

$i_t$ : inflação correspondente a um determinado período  $t$  e

$n$ : número de períodos considerados.

As médias anuais da inflação nos Estados Unidos entre os anos de 2013 e 2021 foram relacionadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Inflação anual nos Estados Unidos entre os anos de 2013 e 2021.

<b>Ano</b>	<b>Inflação [%]</b>
2013	1,47
2014	1,62
2015	0,12
2016	1,26
2017	2,13
2018	2,44
2019	1,81
2020	1,24
2021	2,46
<b>Inflação de 2013 até 2021</b>	<b>15,50%</b>

Fonte: (WORLDWIDE INFLATION DATA, 2021).

A presença de impurezas, tais como mercaptanos e siloxanos, no biogás de aterro, o torna muito agressivo para as peças dos motores. Dessa forma, foram considerados custos de reinvestimento para os grupos geradores para cada 10 anos calculados em US\$1.001,00 por kW instalado (DE BRITO *et al.*, 2021).

Para cálculo das receitas do projeto, foram consideradas as alternativas: i) Venda de RCEs no âmbito do MDL, calculado conforme Equação 23 (BARRAK, 2018); ii) A compensação de energia no âmbito da Resolução Normativa nº 687/2015 (ANEEL, 2015) e iii) Valores obtidos com a economia de energia deixada de ser comprada da concessionária devido à autoprodução de energia.

$$CC = E_E * E_{el} * Cr_c \quad (23)$$

Onde:

CC [US\$/ano]: receita do RCEs;

$E_E$  [tCO<sub>2</sub>/MWh]: emissão evitada;

$E_{el}$  [MWh/ano]: energia elétrica

$Cr_c$  [US\$]: custo do RCEs.

A emissão evitada foi de 2,49 tCO<sub>2eq</sub>.MWh<sup>-1</sup> calculada conforme Equação 24.

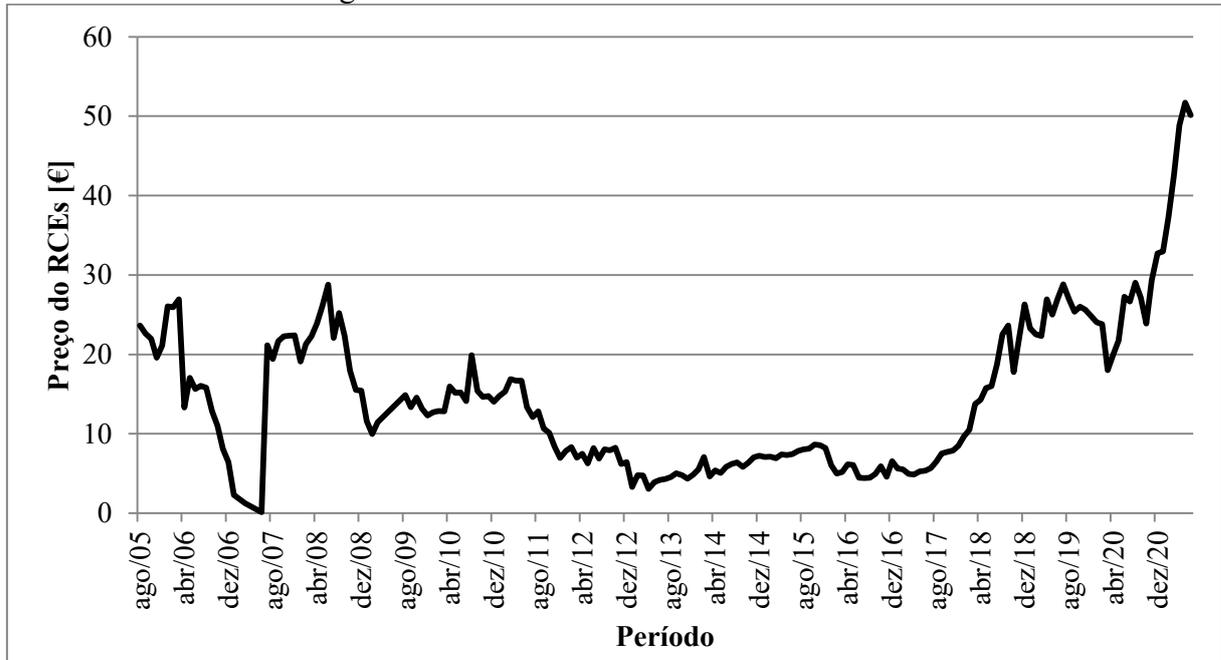
$$E_E = \frac{M_{CO_2eq}}{E_{el}} \quad (24)$$

Onde:

$M_{CO_2eq}$  [t/ano]: massa de  $CO_{2eq}$  usada para conversão elétrica nos conjuntos geradores.

O custo da RCEs em €51,40, apurado dia 02/06/2021, estava entre os maiores valores da série histórica desde o início da comercialização desse ativo em 2005. Além disso, conforme apresentado na Figura 27, esse ativo passou por uma flutuação muito acentuada no ano de 2021.

Figura 27 - Série histórica de valores de RCEs.



Fonte: (INVESTING, 2021).

Assim, de forma a não incorrer num superdimensionamento das receitas, bem como a inviabilidade do projeto caso o valor das RCEs retornem a valores de patamares anteriores, foi adotada para os cálculos a média dos valores das RCEs dos últimos cinco anos, o que correspondeu a €23,69 (INVESTING, 2021).

Para as conversões de moedas estrangeiras, foram utilizados os índices de referência apurados em 21/05/2021 junto ao Banco Central do Brasil (Tabela 10).

Tabela 10 - Índices de conversão de moedas.

<b>Índice</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
USDBLR	Valor do DOLAR em REAL	R\$5,30
EURBLR	Valor do EURO em REAL	R\$6,46
EURUSD	Valor do EURO em DOLAR	US\$1,22

Fonte: (BCB, 2021).

Para o presente trabalho, a análise financeira considerou que os fluxos de caixa são do tipo operacional, ou seja, não foi levado em conta o financiamento do projeto por capital de terceiros.

É preciso observar que o sistema de custos utilizado (*LFGcost-Web*), apesar de representar o que havia de mais atualizado no momento do desenvolvimento dessa pesquisa, apresenta uma precisão de até 50%, dentro da faixa de parâmetros e projeto considerada ótima pelo sistema. Dessa forma, as análises realizadas representam estimativas e devem ser usadas apenas para orientação.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa Seção, são apresentados os resultados das diferentes etapas descritas na metodologia e a discussão dos mesmos, os quais nortearam as conclusões obtidas na investigação.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RSU

Os resultados da gravimetria dos RSU do município de Xangri-Lá/RS para os períodos de baixa e alta temporada no ano de 2018 são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Composição gravimétrica dos RSU no ano de 2018.

Componentes	Baixa temporada (% em massa)		Alta temporada (% em massa)	
	Lado mar	Lado serra	Lado mar	Lado serra
Matéria Orgânica	78,31	76,34	73,36	78,75
Plástico	7,06	11,70	12,16	9,11
Vidro	6,42	0,00	2,32	6,83
Papel e Papelão	4,49	7,38	5,98	3,42
Alumínio	0,64	0,51	0,97	0,19
Metais	0,77	0,76	1,35	0,00
Pano e trapos	1,93	2,80	2,32	0,76
Madeira	0,00	0,00	0,77	0,00
Isopor	0,39	0,51	0,77	0,95
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Fonte: Autor do Trabalho.

Os dados gravimétricos permitem demonstrar que as quantidades dos componentes recicláveis comparadas, individualmente, apresentam grandes variações entre as diferentes localidades e temporadas. As maiores variações encontradas foram para o vidro e metais, com desvio padrão respectivamente 3,29 e 0,55, sendo que seus coeficientes de variações foram respectivamente 85% e 77%. Quando se analisa em termos matéria orgânica e demais resíduos, os dados gravimétricos não apresentaram variações significativas entre os grupos de materiais, considerando a diferentes localidades e temporadas. Os dois grupos de materiais apresentaram desvio padrão de 2,45, sendo que, o coeficiente de variação foi de 3,19% para matéria orgânica e 10,51% para os demais resíduos.

Pode-se constatar que, em média, 76,7% da massa total dos resíduos destinados ao aterro sanitário são constituídos por matéria orgânica, cujos valores se encontram acima da

média nacional (51,4%) (CEMPRE, 2018). Semelhante perfil também tem sido observado em municípios vizinhos, os quais possuem sua extensão territorial ao longo de faixa litorânea e apresentam as mesmas características sazonais de turismo litorâneo, podendo-se destacar Capão da Canoa/RS e Imbé/RS, cujos RSU apresentam um percentual de matéria orgânica de 65% e 71%, respectivamente (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAPÃO DA CANOA, 2016; PREFEITURA MUNICIPAL DE IMBÉ, 2013).

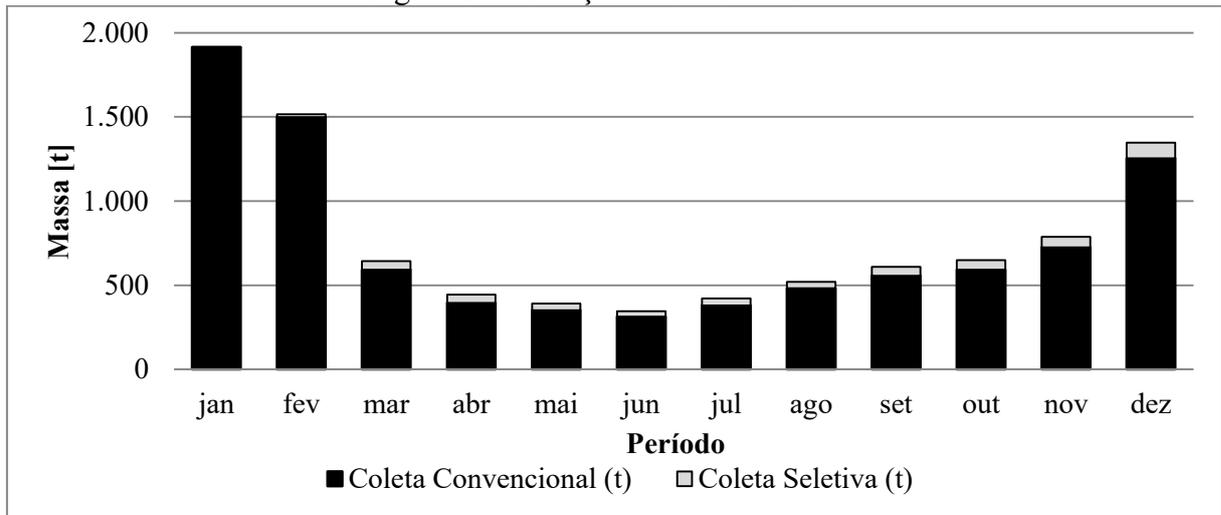
A fração de matéria orgânica está associada à elevada porcentagem de água, o que torna essa fração mais pesada em comparação às demais. Supõe-se, também, que o percentual expressivo de resíduos orgânicos poderia estar associado à presença da coleta seletiva na cidade, que retira uma parcela dos resíduos recicláveis da corrente da coleta convencional. É possível também inferir que, em função das dinâmicas econômicas e sociais da região, há uma baixa produção de resíduos de escritórios e embalagens. Entretanto, faz-se necessário realizar estudos complementares de caracterização qualitativa e quantitativa desses resíduos para uma melhor correlação entre os perfis observados nos diferentes períodos e áreas de coleta. Cabe destacar que, visualmente, foi observada nos resíduos a presença de materiais recicláveis, como latas de alumínio e garrafas PET (Polietileno Tereftalato), os quais apresentam pouca massa, mas que ocupam um grande volume.

## 5.2 QUANTIFICAÇÃO DOS RSU

Com base nos dados obtidos dos relatórios mensais para pagamento pelo uso do aterro municipal de Capão da Canoa/RS para destinação final dos RSU de Xangri-Lá/RS, foi contabilizada a coleta de 9.590,69 toneladas de RSU em 2018, sendo 9.055,49 t (94%) pelos sistemas de coleta convencional e 535,19 t (6%) pelos sistemas de coleta seletiva de materiais recicláveis. Segundo informações obtidas em visita técnica à Associação de Agentes Econômicos e Ecológicos de Capão da Canoa/RS, responsável pela coleta e triagem de resíduos recicláveis, das 535,19 t de RSU coletadas, seletivamente, no processo de triagem nas instalações da Associação, 401,40 t (75%) foram separadas para comercialização e 133,80 t (25%) foram classificadas como rejeitos e, portanto, encaminhadas ao aterro. Assim, calcula-se que 9.189,29 t de RSU foram efetivamente encaminhadas para o aterro em 2018.

Na Figura 28 é apresentada a evolução da coleta dos RSU no município de Xangri-Lá/RS ao longo do ano de 2018.

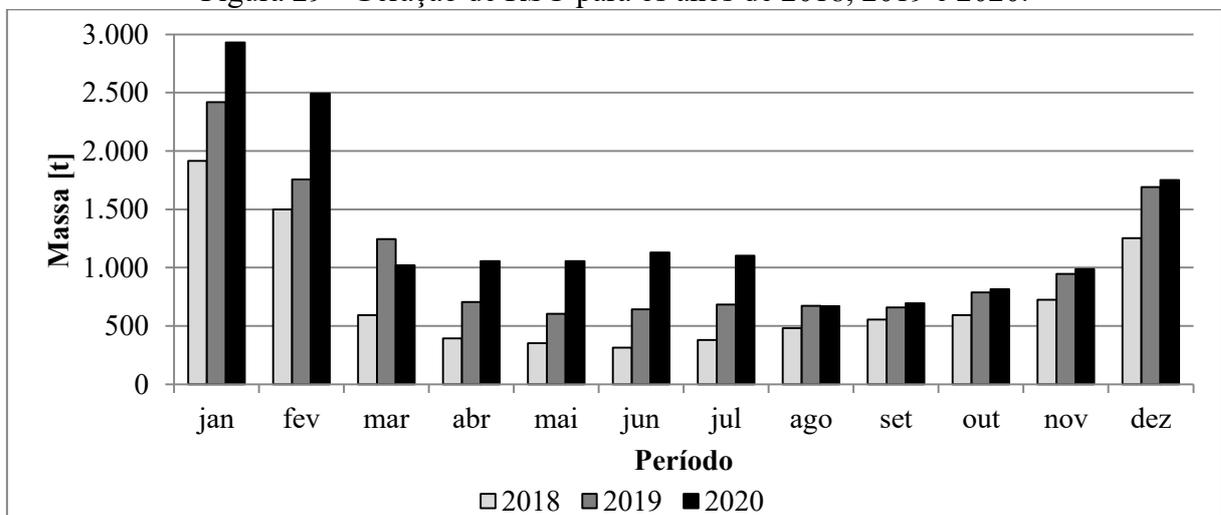
Figura 28 - Geração de RSU em 2018.



Fonte: Autor do Trabalho.

Da análise dos dados, verifica-se que houve aumento (cerca de 3 vezes) na média dos valores obtidos na alta temporada de turismo de litoral (janeiro, fevereiro e dezembro) ( $1.592,75 \text{ t mês}^{-1}$ ) em comparação com a média verificada entre os meses da baixa temporada ( $534,71 \text{ t mês}^{-1}$ ). O desvio padrão entre uma temporada e outra foi de 755,52 e o coeficiente de variação foi de 73,94%. Dessa forma, é possível afirmar que houve grande variação sazonal na quantidade de resíduos entre as diferentes temporadas do ano. O total de RSU coletado nos três meses de alta temporada (4.812,43 t), difere em menos de 1% do total coletado nos nove meses de baixa temporada (4.778,26 t). Conforme observado na Figura 29, para geração de resíduos nos anos subsequentes, a variação sazonal ao longo dos meses do ano apresenta-se como uma característica para a região de estudo.

Figura 29 - Geração de RSU para os anos de 2018, 2019 e 2020.



Fonte: Autor do Trabalho.

Em trabalho descrito na literatura, semelhante perfil de variação sazonal também foi observado no município de Capão da Canoa/RS, onde foram encontrados valores médios de 1.263 t mês<sup>-1</sup> para o período de baixa temporada e 2.123 t mês<sup>-1</sup> para o período de alta temporada (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAPÃO DA CANOA, 2016).

Em outro estudo realizado no município de Imbé/RS, situado a, aproximadamente, 23 km de Xangri-Lá/RS, constatou-se a coleta de 938 t mês<sup>-1</sup> no período de baixa temporada e de 2.346 t mês<sup>-1</sup> no período de alta temporada (TOMACHESKI, 2014).

Portanto, os resultados obtidos na presente pesquisa sinalizam uma enorme complexidade operacional para o gerenciamento dos resíduos com o objetivo de saneamento ambiental, incluindo a valoração dos resíduos para fins energéticos.

Os resultados obtidos das previsões para a geração de resíduos com sazonalidade mensal para o período de 2022 até 2042 estão apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14. Esses valores foram obtidos a partir da aplicação do percentual de crescimento populacional, tomando o ano de 2020 como base.

Tabela 12 - Previsão de geração de RSU no período de 2022 a 2028, em toneladas.

	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
<b>Jan.</b>	3.355,83	3.590,74	3.842,09	4.111,03	4.398,81	4.706,72	5.036,19
<b>Fev.</b>	2.853,57	3.053,32	3.267,05	3.495,75	3.740,45	4.002,28	4.282,44
<b>Mar</b>	1.166,49	1.248,15	1.335,52	1.429,00	1.529,03	1.636,07	1.750,59
<b>Abr.</b>	1.208,35	1.292,93	1.383,44	1.480,28	1.583,90	1.694,77	1.813,41
<b>Mai.</b>	1.208,41	1.293,00	1.383,51	1.480,35	1.583,98	1.694,85	1.813,49
<b>Jun.</b>	1.293,19	1.383,71	1.480,57	1.584,21	1.695,10	1.813,76	1.940,73
<b>Jul.</b>	1.262,74	1.351,14	1.445,72	1.546,92	1.655,20	1.771,06	1.895,04
<b>Ago.</b>	767,57	821,30	878,80	940,31	1.006,13	1.076,56	1.151,92
<b>Set.</b>	795,91	851,62	911,24	975,02	1.043,27	1.116,30	1.194,45
<b>Out.</b>	933,12	998,44	1.068,33	1.143,12	1.223,14	1.308,76	1.400,37
<b>Nov.</b>	1.129,22	1.208,26	1.292,84	1.383,34	1.480,18	1.583,79	1.694,65
<b>Dez.</b>	2.003,37	2.143,61	2.293,66	2.454,22	2.626,01	2.809,83	3.006,52
<b>Total</b>	17.977,78	19.236,23	20.582,76	22.023,56	23.565,21	25.214,77	26.979,80

Fonte: Autor do trabalho.

Tabela 13 - Previsão de geração de RSU no período de 2029 a 2035, em toneladas.

	<b>2029</b>	<b>2030</b>	<b>2031</b>	<b>2032</b>	<b>2033</b>	<b>2034</b>	<b>2035</b>
<b>Jan.</b>	5.388,73	5.765,94	6.169,55	6.601,42	7.063,52	7.557,97	8.087,02
<b>Fev.</b>	4.582,21	4.902,97	5.246,18	5.613,41	6.006,35	6.426,79	6.876,67
<b>Mar.</b>	1.873,13	2.004,25	2.144,55	2.294,67	2.455,29	2.627,17	2.811,07
<b>Abr.</b>	1.940,35	2.076,17	2.221,50	2.377,01	2.543,40	2.721,44	2.911,94
<b>Mai.</b>	1.940,44	2.076,27	2.221,61	2.377,12	2.543,52	2.721,57	2.912,08
<b>Jun.</b>	2.076,58	2.221,94	2.377,47	2.543,90	2.721,97	2.912,51	3.116,38
<b>Jul.</b>	2.027,69	2.169,63	2.321,50	2.484,01	2.657,89	2.843,94	3.043,02
<b>Ago.</b>	1.232,56	1.318,84	1.411,15	1.509,93	1.615,63	1.728,72	1.849,73
<b>Set.</b>	1.278,06	1.367,52	1.463,25	1.565,67	1.675,27	1.792,54	1.918,02
<b>Out.</b>	1.498,39	1.603,28	1.715,51	1.835,60	1.964,09	2.101,57	2.248,69
<b>Nov.</b>	1.813,28	1.940,21	2.076,02	2.221,35	2.376,84	2.543,22	2.721,24
<b>Dez.</b>	3.216,98	3.442,17	3.683,12	3.940,94	4.216,80	4.511,98	4.827,82
<b>Total</b>	28.868,39	30.889,18	33.051,42	35.365,02	37.840,57	40.489,41	43.323,67

Fonte: Autor do trabalho.

Tabela 14 - Previsão de geração de RSU no período de 2036 a 2042, em toneladas.

	<b>2036</b>	<b>2037</b>	<b>2038</b>	<b>2039</b>	<b>2040</b>	<b>2041</b>	<b>2042</b>
<b>Jan.</b>	8.653,12	9.258,83	9.906,95	10.600,44	11.342,47	12.136,44	12.985,99
<b>Fev.</b>	7.358,03	7.873,09	8.424,21	9.013,91	9.644,88	10.320,02	11.042,42
<b>Mar.</b>	3.007,84	3.218,39	3.443,68	3.684,74	3.942,67	4.218,65	4.513,96
<b>Abr.</b>	3.115,77	3.333,88	3.567,25	3.816,96	4.084,14	4.370,03	4.675,93
<b>Mai.</b>	3.115,92	3.334,03	3.567,42	3.817,14	4.084,34	4.370,24	4.676,16
<b>Jun.</b>	3.334,53	3.567,94	3.817,70	4.084,94	4.370,89	4.676,85	5.004,23
<b>Jul.</b>	3.256,03	3.483,95	3.727,83	3.988,78	4.267,99	4.566,75	4.886,42
<b>Ago.</b>	1.979,22	2.117,76	2.266,00	2.424,62	2.594,35	2.775,95	2.970,27
<b>Set.</b>	2.052,28	2.195,94	2.349,65	2.514,13	2.690,12	2.878,43	3.079,92
<b>Out.</b>	2.406,09	2.574,52	2.754,74	2.947,57	3.153,90	3.374,67	3.610,90
<b>Nov.</b>	2.911,73	3.115,55	3.333,64	3.567,00	3.816,69	4.083,85	4.369,72
<b>Dez.</b>	5.165,77	5.527,37	5.914,29	6.328,29	6.771,27	7.245,26	7.752,42
<b>Total</b>	46.356,33	49.601,27	53.073,36	56.788,49	60.763,69	65.017,15	69.568,35

Fonte: Autor do trabalho.

Ao final do período de projeção, a geração estimada de RSU atingiu o montante de cerca de 70 mil toneladas por ano. Essa quantidade é cerca de quatro vezes maior a quantidade total de RSU no ano de 2020, que serviu de base para cálculo das previsões de RSU. Na literatura, é comum encontrar a previsão de resíduos calculada com base na

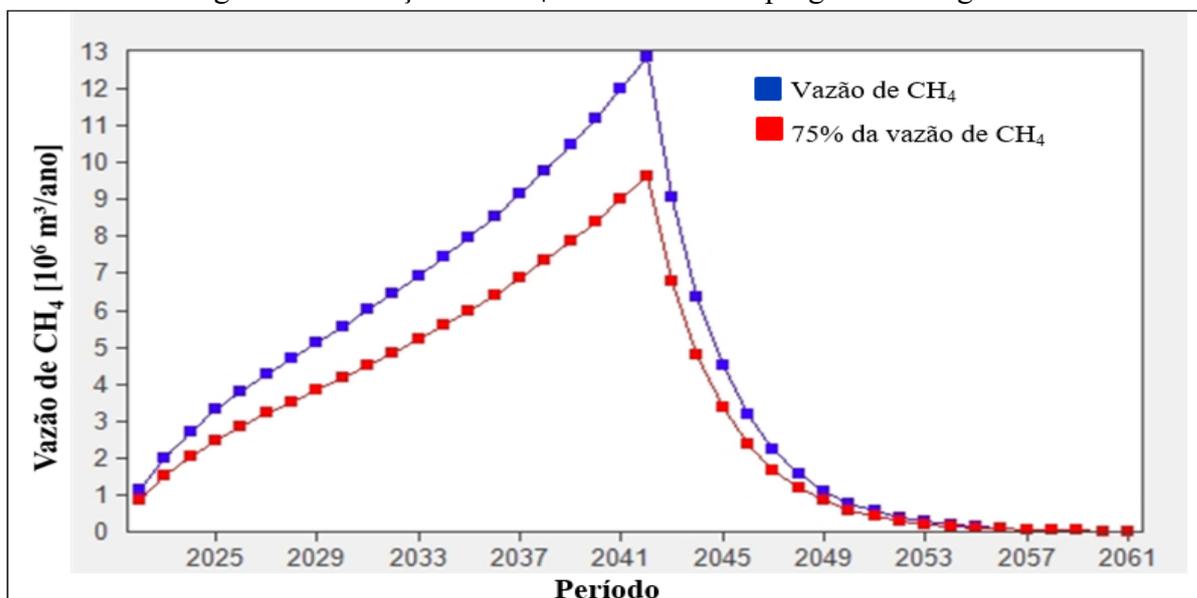
combinação entre o crescimento populacional e o índice de geração *per capita* (BARRAK, 2018; DE BRITO *et al.*, 2021; SANTOS, 2015; SILVA *et al.*, 2017).

O crescimento populacional pode ser calculado por diversos modelos matemáticos e o índice de geração *per capita*, geralmente, é obtido em fontes secundárias de estudos regionalizados. A forma de cálculo deste trabalho se baseou nos dados primários de geração de resíduos mediante a aplicação do percentual de crescimento populacional, obtendo, assim, um crescimento linear da produção de resíduos ao longo dos anos de estudo.

### 5.3 ESTIMATIVA DA VAZÃO DE CH<sub>4</sub>

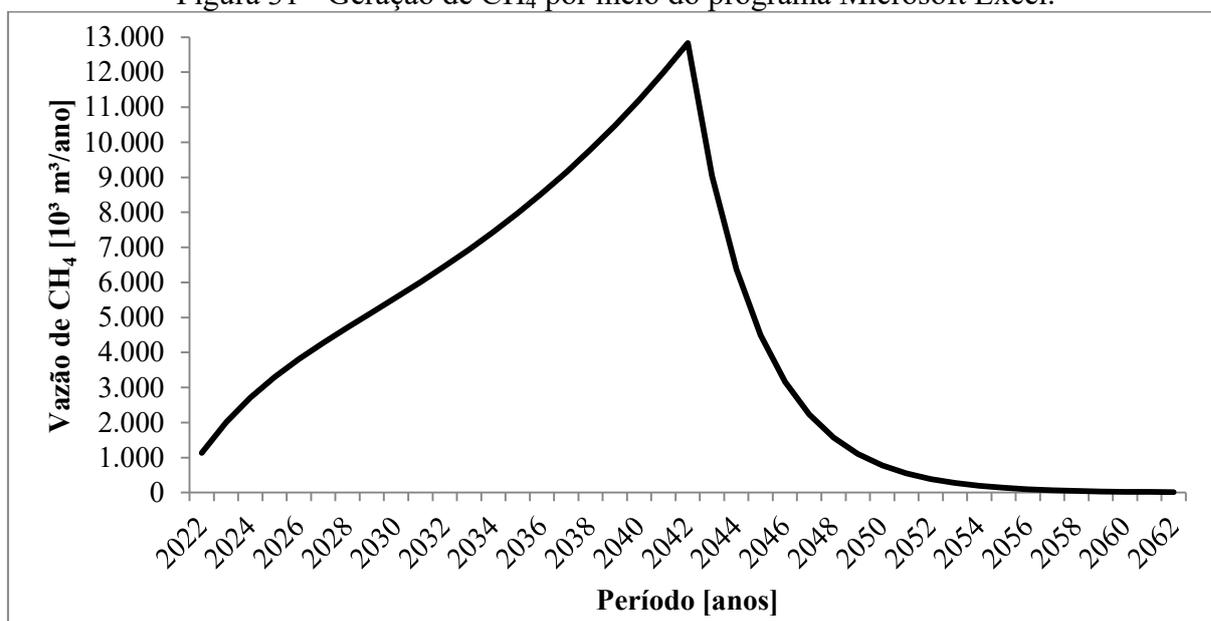
A previsão da quantidade de RSU a serem destinados ao aterro totalizado ano a ano serviu de entrada no programa “Biogás” (CETESB, 2006) para cálculo da previsão de geração de CH<sub>4</sub> (Figura 30). O programa fornece os dados de vazão ao longo do tempo (linha azul do gráfico da Figura 30), com indicação da quantidade de CH<sub>4</sub> após a aplicação do percentual de eficiência de coleta (linha vermelha do gráfico da Figura 30).

Figura 30 - Geração de CH<sub>4</sub> estimada com o programa “Biogás”.



Fonte: Autor do Trabalho.

O uso de matriz de equações baseada em cinética de reações de primeira ordem (Equação 12) no programa Microsoft Excel, permitiu gerar a curva da Figura 31. Os dados obtidos foram usados para conferência dos resultados encontrados no programa “Biogás”, bem como, serviram de base para construção e validação das próximas etapas de cálculo.

Figura 31 - Geração de CH<sub>4</sub> por meio do programa Microsoft Excel.

Fonte: Autor do Trabalho.

O perfil da estimativa da vazão de CH<sub>4</sub> indica que, no início da disposição de resíduos na célula de aterro (ano de 2022), processos bioquímicos de decomposição dos resíduos dão início à atividade metanogênica, a qual aumenta, de forma exponencial, ao longo dos anos na medida em que sucessivas camadas de resíduos são adicionadas à célula de aterro. Segundo estimativa da modelagem, em 2042, momento em que a célula do aterro deixa de receber resíduos, é observado o ponto de máxima produção de CH<sub>4</sub>, com o valor de 12.835,26 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>, correspondendo à potência de 10.845,63 kW, calculada com a Equação 16 (considerado somente as perdas na coleta de gases nas tubulações do aterro).

Quando se aplicou o rendimento de 33% de queima para conversão em energia elétrica, a estimativa da potência elétrica foi de 3.579,06 kW em 2042. Nos anos subsequentes ao pico de atividade metanogênica, sem a adição de novos resíduos na célula de aterro, observa-se o declínio da produção de CH<sub>4</sub>, que se encerra após duas décadas, conforme estimativas da modelagem.

O programa “Biogás” (CETESB, 2006) calcula o potencial energético dos gases do aterro, somente com sazonalidade anual. Dessa forma, as estimativas de vazão de CH<sub>4</sub> com sazonalidade mensal, foram calculadas com o auxílio do programa Microsoft Excel. Na Tabela 15 são apresentadas as vazões obtidas com periodicidade mensal entre os anos de 2022 a 2062.

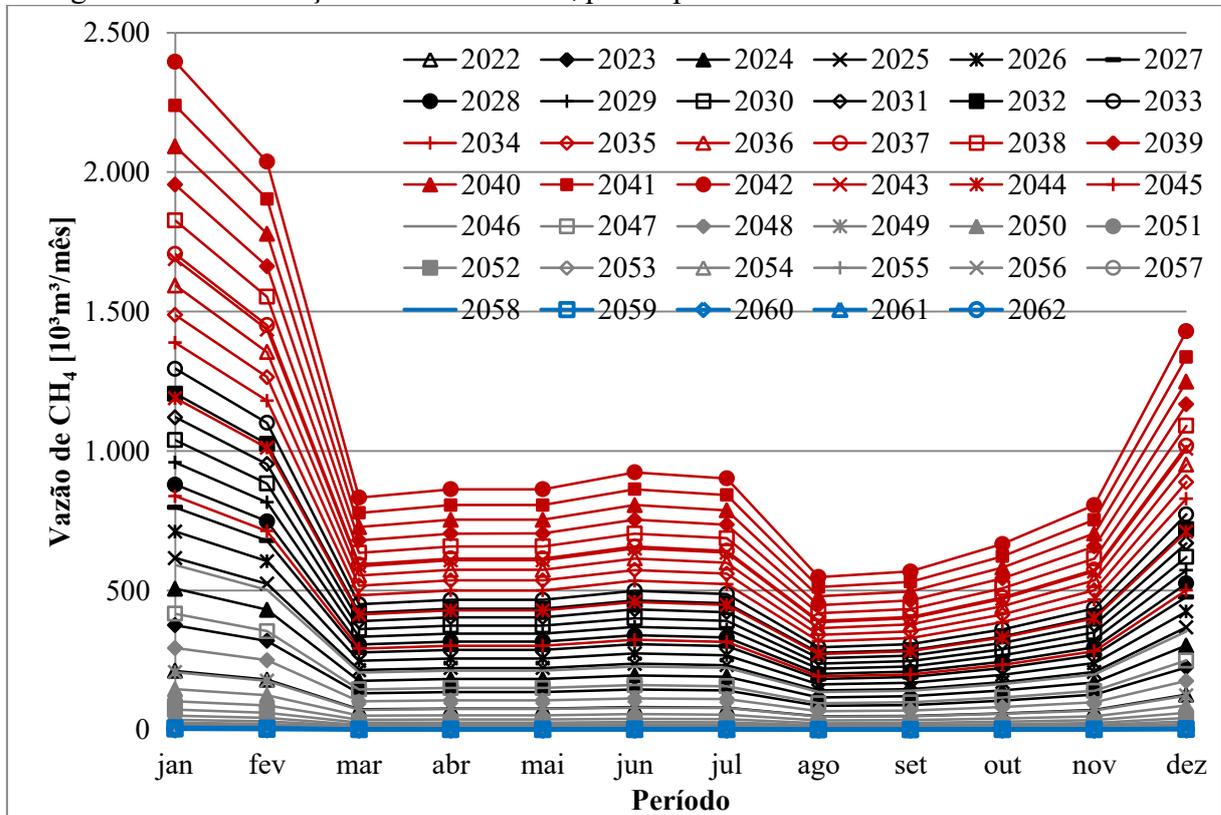
Tabela 15 - Estimativas das vazões de CH<sub>4</sub> para o período de 2022 a 2062 em 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/mês.

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
2022	211,42	179,78	73,49	76,13	76,13	81,47	79,55	48,36	50,14	58,79	71,14	126,21
2023	375,20	319,04	130,42	135,10	135,11	144,59	141,18	85,82	88,99	104,33	126,25	223,99
2024	506,45	430,65	176,04	182,36	182,37	195,16	190,57	115,84	120,12	140,82	170,42	302,34
2025	615,88	523,71	214,08	221,76	221,78	237,33	231,75	140,87	146,07	171,25	207,24	367,67
2026	711,13	604,70	247,19	256,06	256,07	274,04	267,59	162,66	168,66	197,74	239,29	424,53
2027	797,65	678,27	277,26	287,21	287,23	307,38	300,14	182,45	189,18	221,80	268,41	476,18
2028	879,37	747,76	305,67	316,64	316,66	338,87	330,89	201,14	208,56	244,52	295,91	524,97
2029	959,17	815,62	333,41	345,37	345,39	369,62	360,92	219,39	227,49	266,71	322,76	572,61
2030	1.039,17	883,64	361,22	374,18	374,20	400,45	391,02	237,69	246,46	288,95	349,68	620,37
2031	1.120,97	953,20	389,65	403,64	403,65	431,97	421,80	256,40	265,86	311,70	377,20	669,20
2032	1.205,83	1.025,35	419,15	434,19	434,21	464,67	453,73	275,81	285,99	335,29	405,75	719,86
2033	1.294,73	1.100,95	450,05	466,20	466,22	498,93	487,19	296,14	307,07	360,01	435,67	772,93
2034	1.388,54	1.180,72	482,66	499,98	500,00	535,08	522,48	317,60	329,32	386,10	467,24	828,93
2035	1.487,97	1.265,27	517,22	535,78	535,81	573,40	559,90	340,34	352,90	413,75	500,69	888,29
2036	1.593,70	1.355,17	553,97	573,85	573,88	614,14	599,68	364,52	377,98	443,15	536,27	951,41
2037	1.706,37	1.450,98	593,14	614,42	614,45	657,56	642,08	390,30	404,70	474,47	574,18	1.018,67
2038	1.826,59	1.553,21	634,93	657,71	657,74	703,89	687,32	417,79	433,22	507,90	614,64	1.090,45
2039	1.955,01	1.662,41	679,56	703,95	703,98	753,37	735,64	447,17	463,67	543,61	657,85	1.167,11
2040	2.092,25	1.779,11	727,27	753,37	753,40	806,26	787,28	478,56	496,22	581,77	704,03	1.249,04
2041	2.238,98	1.903,88	778,27	806,20	806,24	862,80	842,49	512,12	531,02	622,57	753,40	1.336,63
2042	2.395,90	2.037,31	832,82	862,70	862,74	923,27	901,54	548,01	568,24	666,21	806,21	1.430,31
2043	1.688,36	1.435,67	586,88	607,94	607,97	650,62	635,30	386,18	400,43	469,47	568,13	1.007,92
2044	1.189,77	1.011,70	413,57	428,41	428,43	458,48	447,69	272,13	282,18	330,83	400,35	710,27
2045	838,42	712,93	291,43	301,89	301,91	323,09	315,48	191,77	198,85	233,13	282,12	500,52
2046	590,82	502,39	205,37	212,74	212,75	227,68	222,32	135,14	140,13	164,28	198,81	352,71
2047	416,34	354,03	144,72	149,92	149,92	160,44	156,66	95,23	98,75	115,77	140,10	248,55
2048	293,39	249,48	101,98	105,64	105,65	113,06	110,40	67,11	69,58	81,58	98,73	175,15
2049	206,75	175,81	71,87	74,45	74,45	79,67	77,80	47,29	49,04	57,49	69,57	123,43
2050	145,69	123,89	50,64	52,46	52,46	56,14	54,82	33,32	34,55	40,51	49,03	86,98
2051	102,67	87,30	35,69	36,97	36,97	39,56	38,63	23,48	24,35	28,55	34,55	61,29
2052	72,35	61,52	25,15	26,05	26,05	27,88	27,22	16,55	17,16	20,12	24,35	43,19
2053	50,98	43,35	17,72	18,36	18,36	19,65	19,18	11,66	12,09	14,18	17,16	30,44
2054	35,93	30,55	12,49	12,94	12,94	13,85	13,52	8,22	8,52	9,99	12,09	21,45
2055	25,32	21,53	8,80	9,12	9,12	9,76	9,53	5,79	6,00	7,04	8,52	15,11
2056	17,84	15,17	6,20	6,42	6,42	6,88	6,71	4,08	4,23	4,96	6,00	10,65
2057	12,57	10,69	4,37	4,53	4,53	4,84	4,73	2,88	2,98	3,50	4,23	7,51
2058	8,86	7,53	3,08	3,19	3,19	3,41	3,33	2,03	2,10	2,46	2,98	5,29
2059	6,24	5,31	2,17	2,25	2,25	2,41	2,35	1,43	1,48	1,74	2,10	3,73
2060	4,40	3,74	1,53	1,58	1,58	1,70	1,66	1,01	1,04	1,22	1,48	2,63
2061	3,10	2,64	1,08	1,12	1,12	1,19	1,17	0,71	0,74	0,86	1,04	1,85
2062	2,18	1,86	0,76	0,79	0,79	0,84	0,82	0,50	0,52	0,61	0,74	1,30

Fonte: Autor do Trabalho.

Os dados obtidos das vazões com sazonalidade mensal para todo o período do estudo estão apresentados na forma gráfica (Figura 32) para melhor visualização das informações.

Figura 32 - Distribuição da vazão de CH<sub>4</sub> para o período de 2022 a 2062 em 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/mês.



Fonte: Autor do Trabalho.

O gráfico da Figura 32, plotado a partir dos resultados obtidos na Tabela 15, demonstra de forma visual a presença expressiva de sazonalidade na geração de CH<sub>4</sub> para a área de estudo. As linhas em preto representam o início da geração de CH<sub>4</sub> no aterro com valores intermediários. Aproximadamente uma década depois, se observa um aumento na geração de CH<sub>4</sub>, representado de forma predominante por linhas em vermelho. Após cessar a deposição de resíduos, a geração de CH<sub>4</sub> cai para níveis inferiores, linhas na cor cinza, sendo que na última década, a geração é irrisória. A diferença entre a menor e a maior geração no mesmo ano se acentua, conforme aumenta a atividade metanogênica. Esse perfil pode ser em decorrência das grandes quantidades de resíduos destinadas ao aterro nos meses de turismo de litoral (janeiro, fevereiro e dezembro), sendo que a relação entre o maior e o menor valor de vazão é constante (4,37), independente do ano considerado. Essa relação constante já era esperada, pois reflete as hipóteses estabelecidas na metodologia, de estabilidade nas políticas de gestão de resíduos e na atividade econômica.

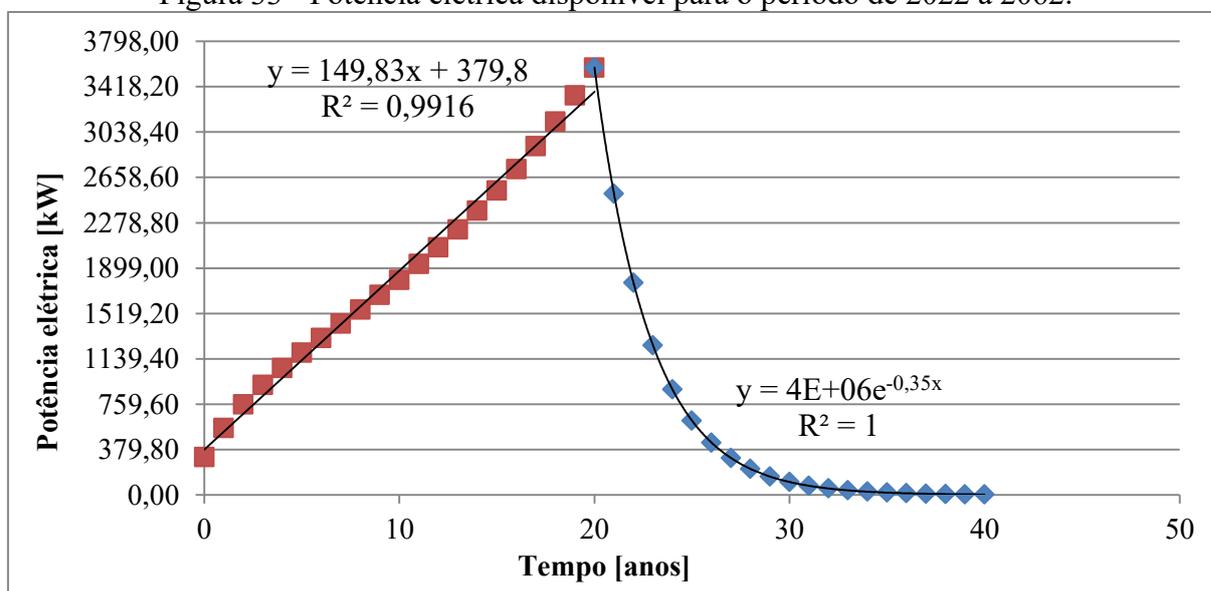
## 5.4 ESTIMATIVA DA POTÊNCIA

A potência está, intrinsecamente, relacionada ao uso do CH<sub>4</sub>. Para a presente pesquisa, seu uso foi estudado na forma de potência elétrica, calculada em termos de potência disponível e potência instalada. A potência disponível guarda relação direta com o poder calorífico e com a vazão do CH<sub>4</sub> gerado no aterro. A potência instalada depende da tecnologia empregada para aproveitamento energético, associada a uma potência que corresponda a uma máxima geração de energia. Os resultados dos seis cenários de motorização para as diferentes metodologias estão apresentados nas próximas seções.

### 5.4.1 Método Escalonado para Motorização

A potência disponível foi calculada mediante uso da Equação 16. Foram tomados cada um dos valores de vazão obtidos, anualmente, para gerar o gráfico da Figura 33.

Figura 33 - Potência elétrica disponível para o período de 2022 a 2062.



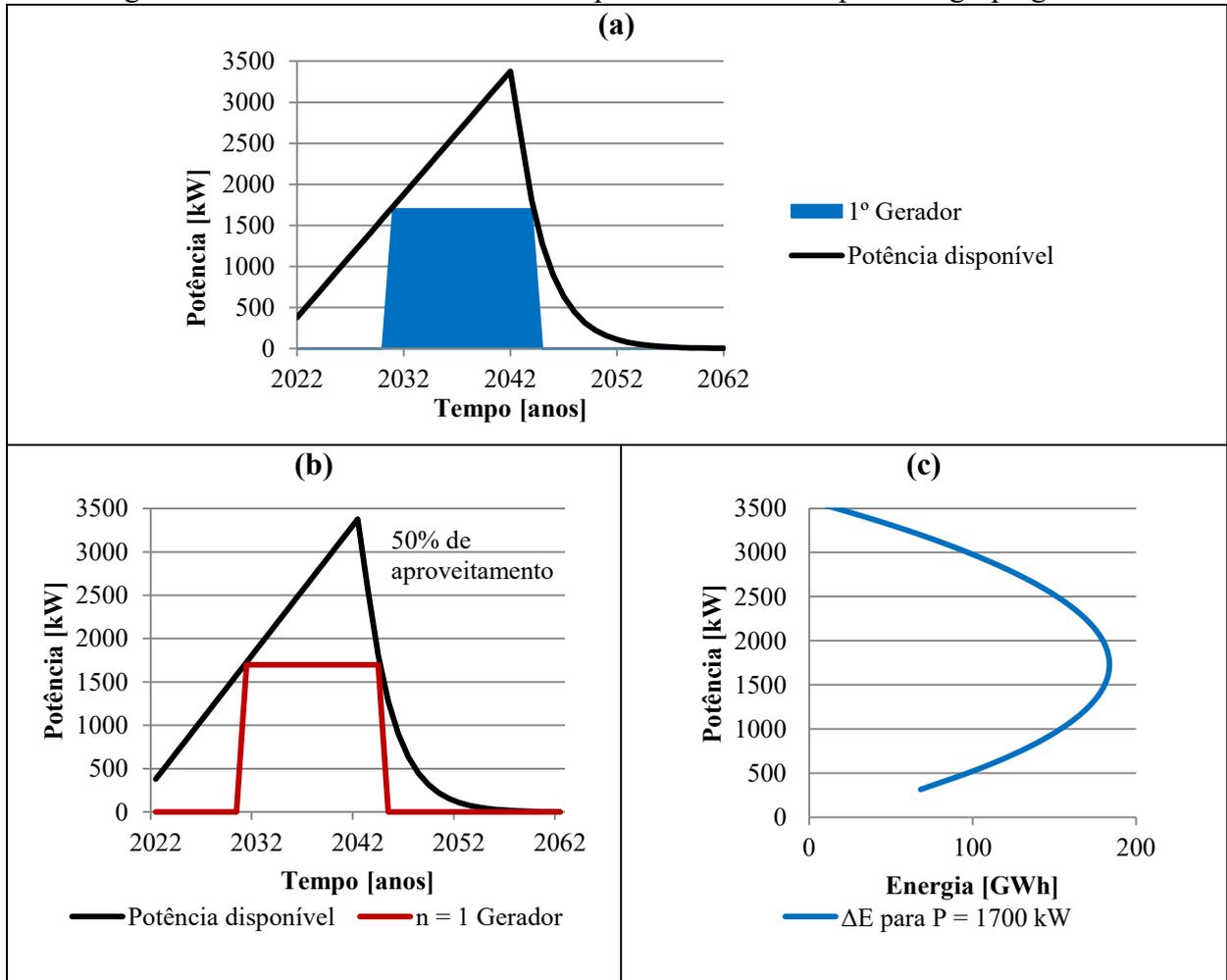
Fonte: Autor do trabalho.

Os resultados apontam que o aproveitamento hipotético de todo o potencial elétrico do CH<sub>4</sub> ao longo de todo o período do estudo (2022 até 2062) seria capaz de gerar 378,22 GWh, calculado por meio da Equação 17.

As equações que melhor se ajustaram às curvas de potência disponível foram obtidas com auxílio do programa Microsoft Excel. Essas equações foram usadas para calcular o

tempo de disponibilidade para cada potência. O binômio tempo de disponibilidade e potência, aplicados na Equação 17 permitiu encontrar a energia máxima para compor o cenário C1.1, mediante a proposição de um grupo gerador (Figura 34).

Figura 34 - Cenário C1.1 - Potência disponível e instalada para um grupo gerador.



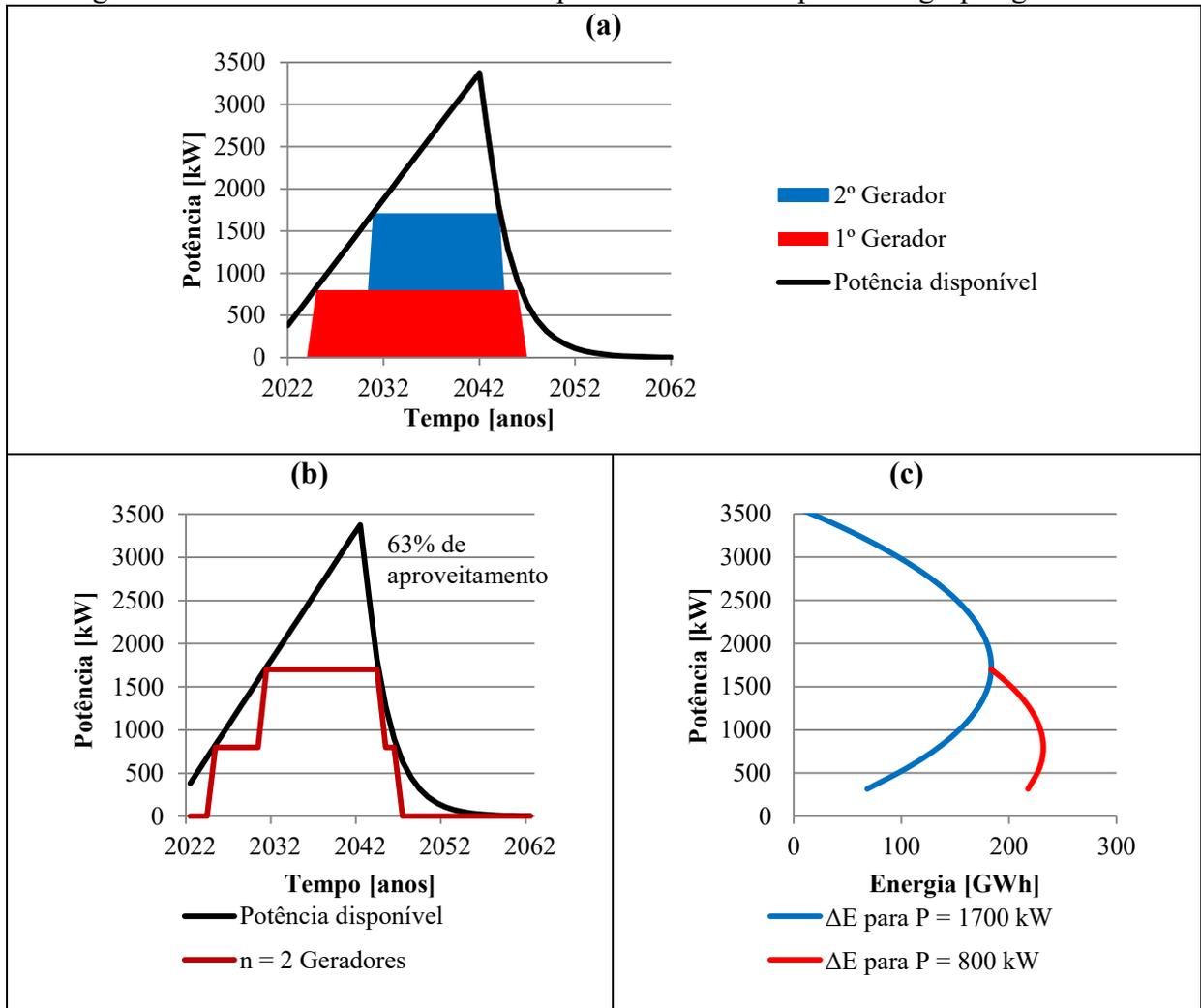
Fonte: Autor do Trabalho.

Os resultados apontam que o grupo gerador com potência de 1.700 kW do cenário C1.1 (Figura 34a) iniciaria sua operação em 2031 e funcionaria com capacidade máxima até o ano de 2044 para gerar 187 GWh (Figura 34c), com aproveitamento de aproximadamente 50% do potencial hipotético de geração máxima possível (Figura 34b).

A energia do CH<sub>4</sub> gerado entre os anos de 2022 e 2031, e entre 2044 e 2062, é aproveitada no cenário C1.2. Para tanto, calcula-se uma potência P, tal que:  $0 < P < 1700$  kW. A energia intermediária é calculada mediante a aplicação da potência obtida na Equação 18, que dentro do seu intervalo de disponibilidade, representa a maior variação possível de energia.

Dessa forma, o cenário C1.2 foi composto da energia máxima calculada para o cenário C1.1, mais a máxima variação de energia para os intervalos marginais da curva de potência do aterro (Figura 35).

Figura 35 - Cenário C1.2 - Potência disponível e instalada para dois grupos geradores.

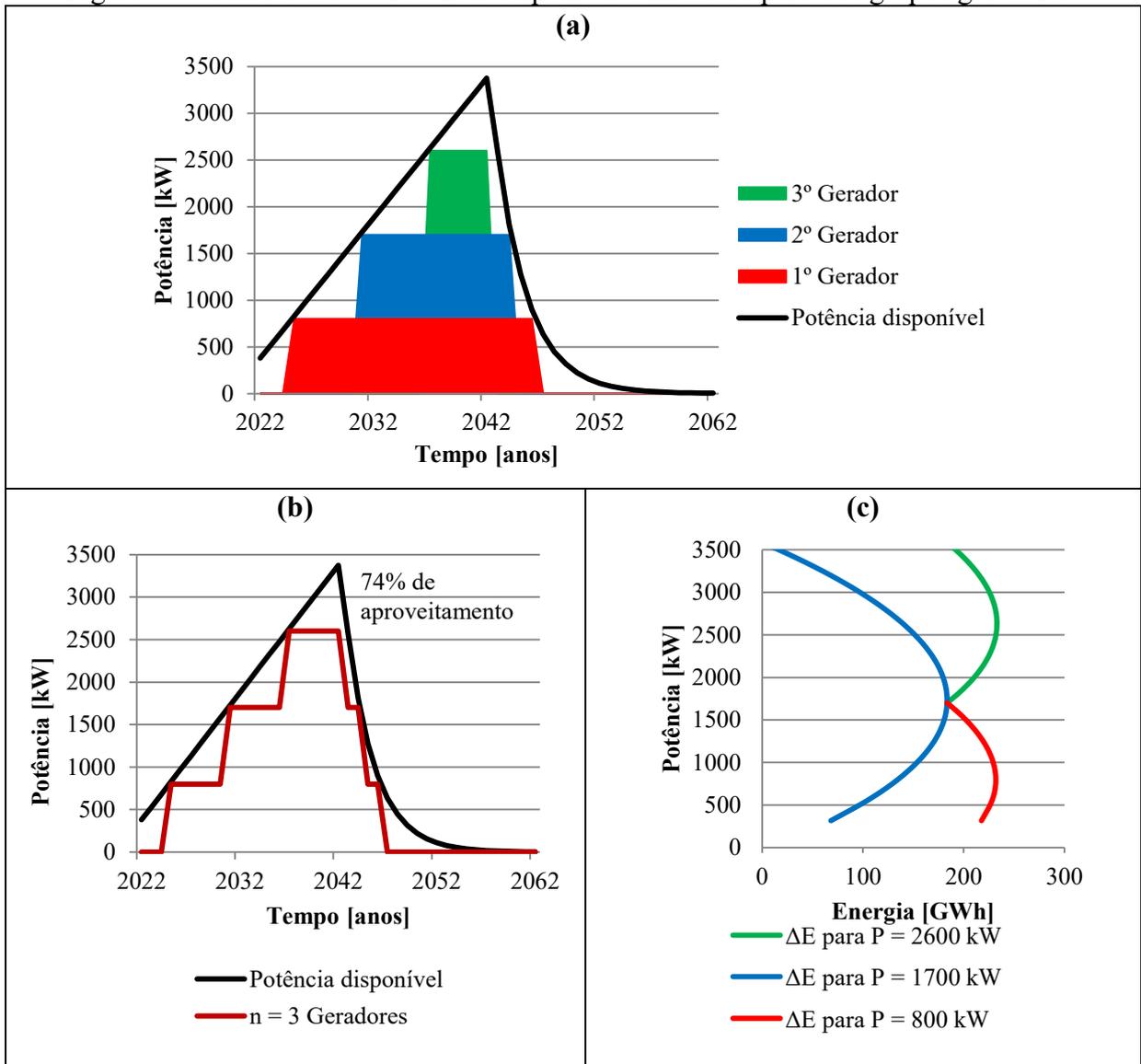


Fonte: Autor do Trabalho.

Na configuração energética decorrente do cenário C1.2, um grupo gerador de potência de 800 kW entraria em operação em 2025 até 2046. Em 2031 entraria um segundo grupo gerador de 900 kW e operaria até 2044 (Figura 35a). Esse conjunto seria capaz de gerar 238,10 GWh (Figura 35c), correspondente a, aproximadamente, 63% de aproveitamento do potencial do aterro (Figura 35b).

A composição das energias obtidas no cenário C1.2, somadas à máxima variação de energia para a potência  $P$ , tal que  $1.700 \text{ kW} < P < 3.579,06 \text{ kW}$ , foram consideradas no cenário C1.3, mediante a aplicação da Equação 19 para gerar os gráficos da Figura 36.

Figura 36 - Cenário C1.3 - Potência disponível e instalada para três grupos geradores.



Fonte: Autor do Trabalho.

Nesse cenário, um primeiro grupo gerador de 800 kW operaria entre os anos de 2025 e o ano de 2046. Um segundo grupo gerador de 900 kW entraria em 2031 até 2044. Um terceiro grupo gerador também de 900 kW iniciaria sua operação em 2037 e funcionaria até 2042 (Figura 36a). Todos os geradores seriam capazes de gerar 280,67 GWh (Figura 36c), correspondendo a, aproximadamente, 74% do aproveitamento do potencial do aterro (Figura 36b).

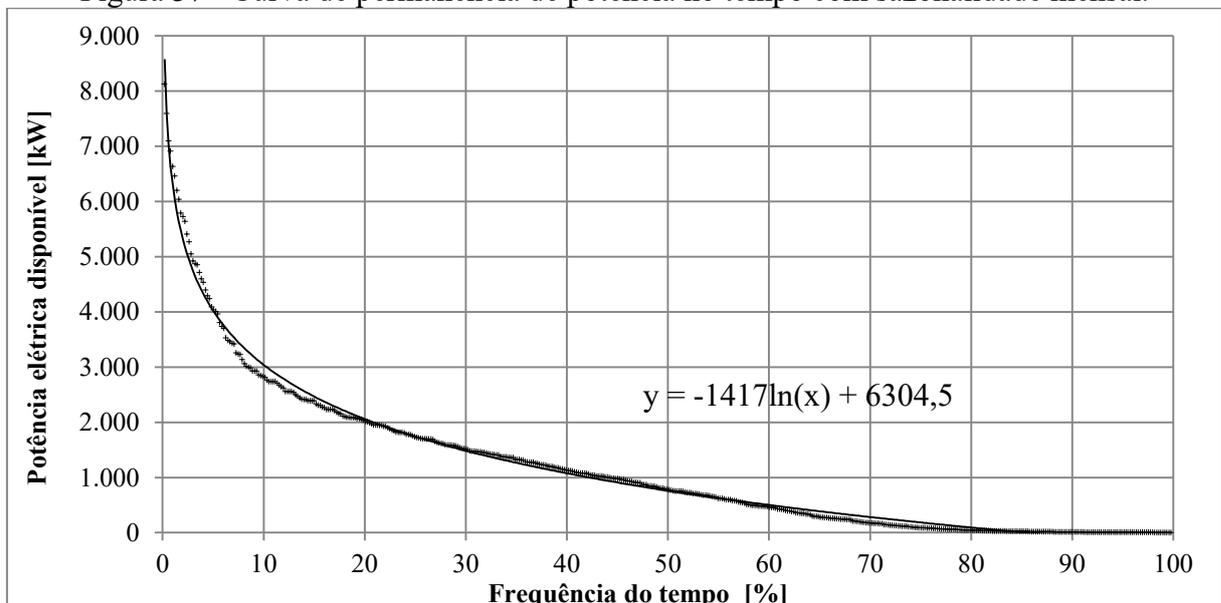
A análise dos cenários de motorização permite verificar que, conforme são adicionados grupos geradores de forma escalonada, observa-se um crescimento no aproveitamento do potencial do aterro, com conseqüente aumento na produção de energia.

Esse crescimento acaba por refletir nos indicadores ambientais, pois a energia gerada a partir do CH<sub>4</sub> de aterro evita o lançamento de GEE na atmosfera, bem como o consumo de outras fontes de energia do Sistema Interligado Nacional (SIN). Assim, em termos ambientais e energéticos o cenário C1.3 seria o mais vantajoso, porém, a sustentabilidade desse arranjo de motorização também depende da viabilidade econômica e financeira, a qual também foi investigada neste trabalho, cujos resultados obtidos serão, posteriormente, descritos.

#### 5.4.2 Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal

A expressiva variação na geração de CH<sub>4</sub> ao longo dos meses do ano ensejou a proposição de técnicas matemáticas de análise, de forma a possibilitar o estudo da influência dessa variação na previsão das potências dos grupos geradores. A técnica utilizada na presente pesquisa corresponde à utilizada para calcular a potência ótima em PCH, que se baseia na construção de uma curva de permanência de potência no tempo (%). Assim, o ordenamento das vazões apresentadas na Tabela 14 de forma decrescente possibilitou construir a curva de permanência de potência com periodicidade mensal (Figura 37).

Figura 37 - Curva de permanência de potência no tempo com sazonalidade mensal.



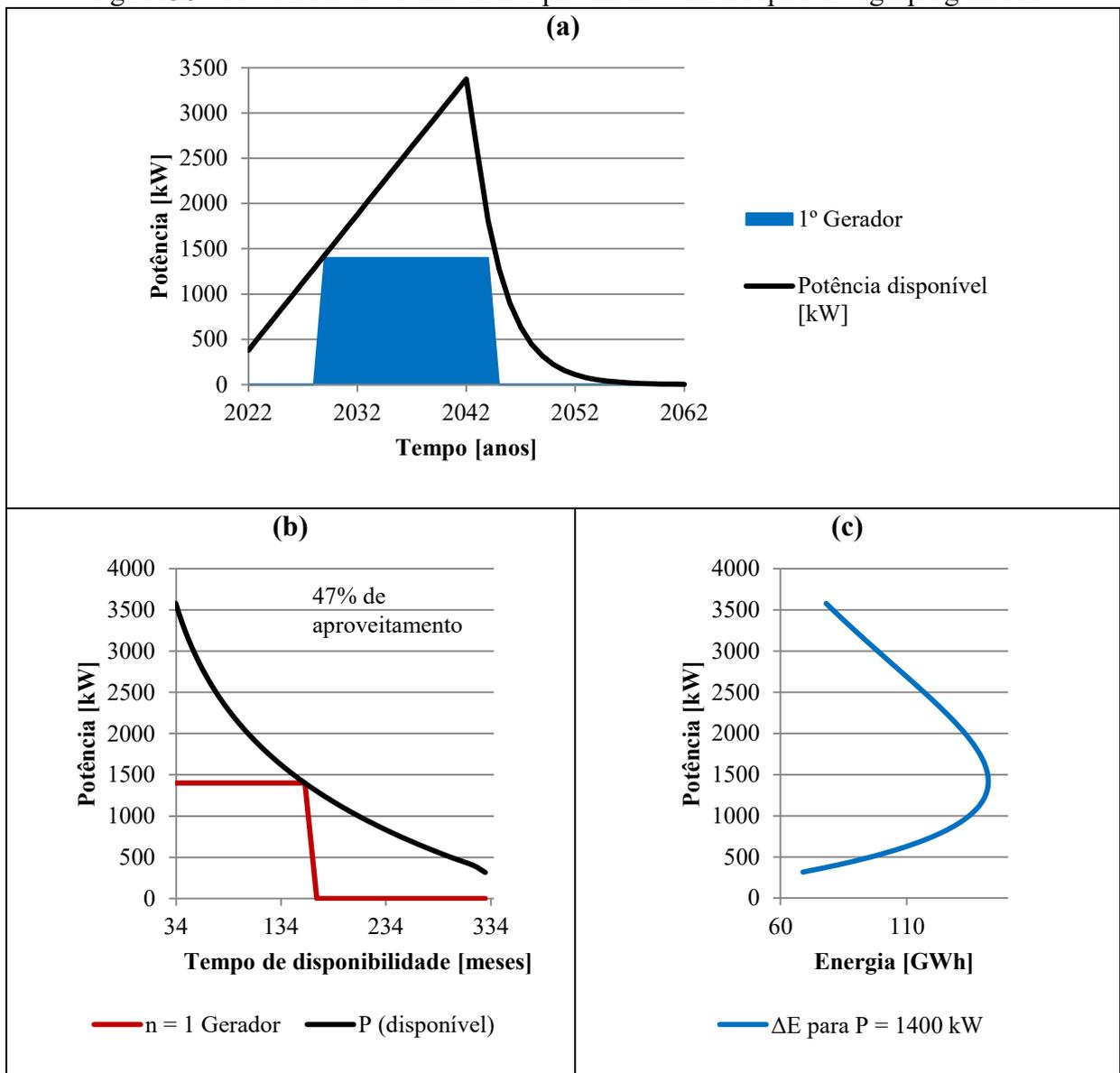
Fonte: Autor do Trabalho.

É possível aferir, com base na análise da curva, que o aumento da potência disponível é inversamente proporcional a frequência de sua ocorrência. A potência de 2.000 kW ou maiores tem probabilidade de ocorrerem em 20 % do tempo ou menos, por exemplo.

Para potências inferiores a 800 kW, sua probabilidade de ocorrência é maior ou igual a 50 %, ou seja, por 20 anos ou mais, considerando o horizonte de estudo da presente pesquisa. A potência máxima possível estimada foi de 8.128,37 kW, com probabilidade de ocorrência menor ou igual a 0,2% do tempo. A menor potência elétrica verificada foi de 1,70 kW, com probabilidade de ocorrência maior ou igual a 99,8% do tempo.

Com auxílio do programa Microsoft Excel, foi determinada a equação que melhor se ajustasse à curva de permanência para determinação dos tempos de disponibilidade de cada valor de potência. O uso da Equação 17 nessa nova distribuição possibilitou a definição da potência correspondente à energia máxima possível para compor o cenário C2.1 (Figura 38).

Figura 38 - Cenário C2.1 - Potência disponível e instalada para um grupo gerador.

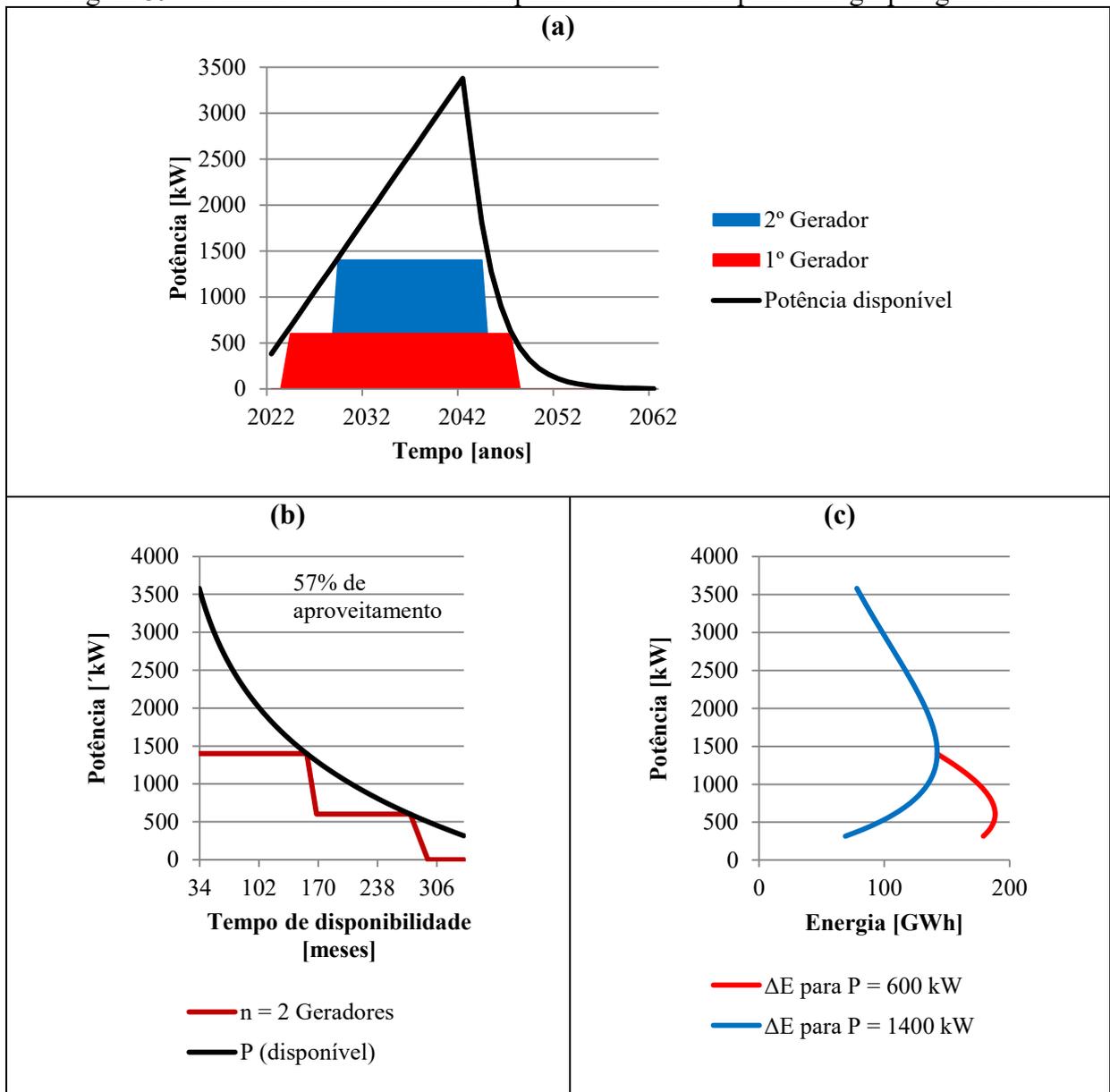


Fonte: Autor do Trabalho.

No primeiro cenário decorrente desse método de análise sazonal, um grupo gerador com potência de 1.400 kW entraria em operação em 2029 até 2044 (Figura 38a), seu trabalho em capacidade máxima seria capaz de gerar 176,60 GWh (Figura 38c), com aproveitamento de aproximadamente 47% do potencial disponível (Figura 38b).

O cenário C2.2 incorpora a energia gerada no cenário anterior e explora a máxima variação de energia possível, calculada por meio da Equação 17, para uma potência  $P$ , tal que  $0 < P < 1.400$  kW, combinada a um tempo de disponibilidade descontado do tempo de disponibilidade relacionado à potência de 1.400 kW (Figura 39).

Figura 39 - Cenário C2.2 - Potência disponível e instalada para dois grupos geradores.

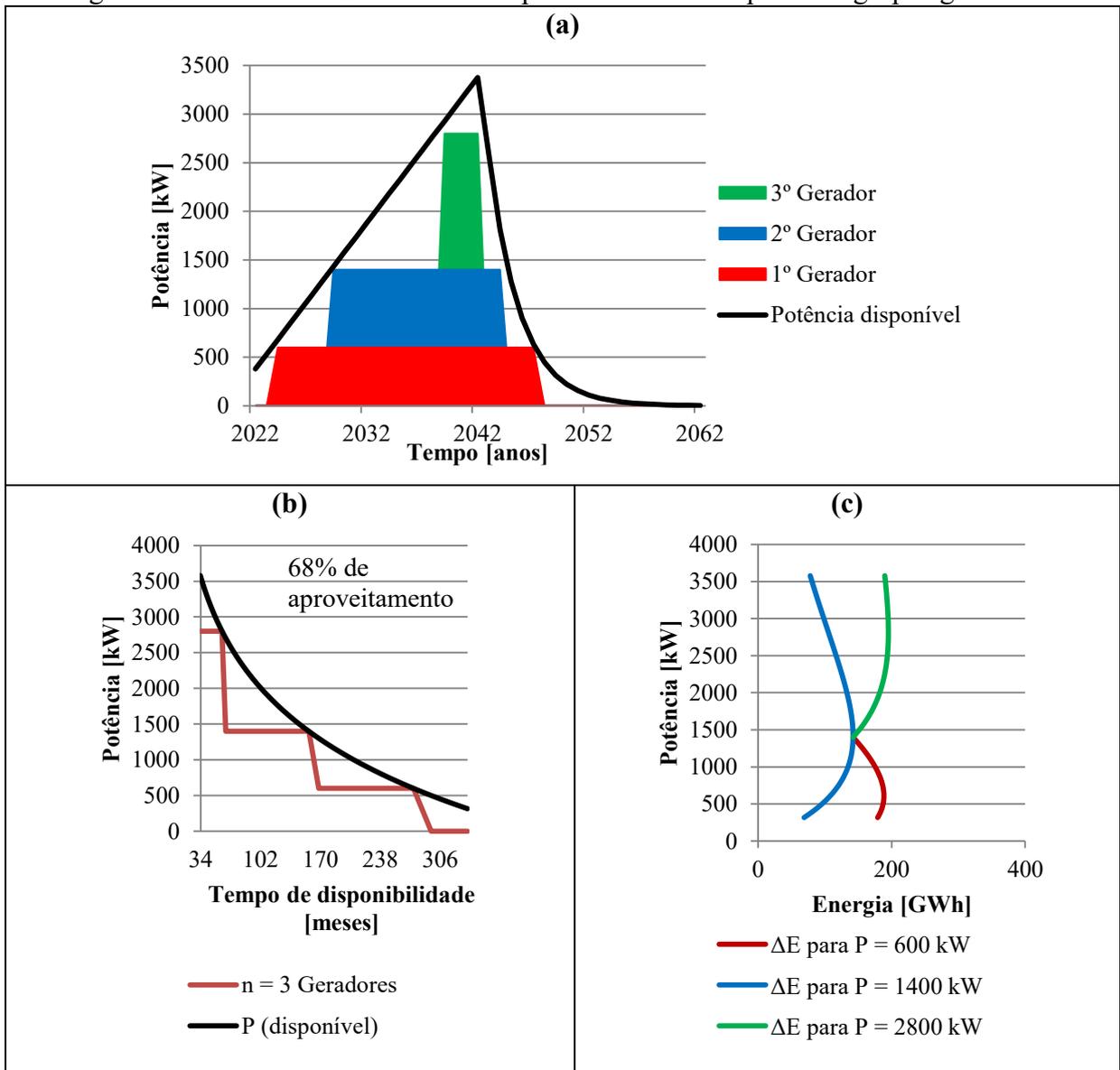


Fonte: Autor do Trabalho.

Nas condições do cenário C2.2, um grupo gerador de potência de 600 kW entraria em operação em 2024 até 2047. No ano de 2029 entraria um segundo grupo gerador de 800 kW e operaria até o ano de 2044 (Figura 39a). Esse conjunto seria capaz de gerar 214,44 GWh (Figura 39c), correspondente a, aproximadamente, 57% de aproveitamento do potencial do aterro (Figura 39b).

O cenário C2.3 é baseado na hipótese de se aproveitar as energias obtidas no cenário C2.2, somadas à máxima variação de energia, calculada por meio da Equação 17, para uma potência P, tal que  $1.400 \text{ kW} < P < 3.579,06 \text{ kW}$ . Essa potência foi combinada com seu respectivo tempo de disponibilidade para construção dos gráficos da Figura 40.

Figura 40 - Cenário C2.3 - Potência disponível e instalada para três grupos geradores.



Fonte: Autor do Trabalho.

Nesse cenário, um primeiro grupo gerador de 600 kW operaria entre 2024 e 2047. Um segundo grupo gerador de 800 kW entraria em 2029 até 2044. Um terceiro grupo gerador de 1.400 kW iniciaria sua operação em 2039 e funcionaria até 2042 (Figura 40a). Todos os geradores seriam capazes de gerar 258,60 GWh (Figura 40c), correspondendo a, aproximadamente, 68% do aproveitamento do potencial do aterro (Figura 40b).

De forma similar aos cenários dimensionados na seção anterior (5.4.1), a adição de grupos geradores melhora o aproveitamento do potencial do aterro, com consequente aumento na produção de energia. Assim, o cenário C2.3 é o mais vantajoso em termos ambientais e energéticos. No entanto, a análise dos indicadores econômicos e financeiros apresenta-se como uma ferramenta necessária para verificação da sustentabilidade.

### 5.4.3 Comparação das metodologias

Os cenários dimensionados pelas metodologias empregadas, conforme seções anteriores, seguiram a mesma sistemática de adição de grupos geradores, o que permitiu análise comparada dos diferentes arranjos de potência e variáveis decorrentes. Os resultados obtidos foram organizados na Tabela 16 para facilitar a comparação.

Tabela 16 - Potência instalada dos grupos geradores para cada cenário.

Cenário	Gerador	Potência [kW]	Início da geração [anos]	Fim da geração [anos]	$\Delta E$ [GWh]	Energia [GWh]	Aproveitamento [%]
1.1	1°	1700	2031	2044	187,64	187,64	50
1.2	1°	800	2025	2046	138,76	238,10	63
	2°	900	2031	2044	99,34		
1.3	1°	800	2025	2046	138,97	280,67	74
	2°	900	2031	2044	99,34		
	3°	900	2037	2042	42,57		
2.1	1°	1400	2029	2044	176,60	176,60	47
2.2	1°	600	2024	2047	113,53	214,44	57
	2°	800	2029	2044	100,92		
2.3	1°	600	2024	2047	113,53	258,60	68%
	2°	800	2029	2044	100,92		
	3°	1400	2039	2042	44,15		
<b>Energia elétrica total disponível [GWh]</b>							<b>378,22</b>

Fonte: Autor do Trabalho.

A proposição de potências instaladas para grupos geradores baseada em dados de vazões anuais de CH<sub>4</sub> (cenários C1.1, C1.2 e C1.3) resultou no dimensionamento de potências maiores, comparadas às potências baseadas em dados de vazões mensais de CH<sub>4</sub> (cenários C2.1, C2.2 e C2.3), porém, com tempo de disponibilidade menores.

A vazão de CH<sub>4</sub> analisada em periodicidade anual pelo Método Escalonado para Motorização não é capaz de avaliar as significativas flutuações de vazões que ocorrem em cada mês. Conforme discutido na seção 5.2, as quantidades de resíduos destinados ao aterro nos três meses da alta temporada se equiparam aos nove meses da baixa temporada, sendo que vazão de CH<sub>4</sub> para o mês de janeiro é 4,37 vezes maior que a vazão de CH<sub>4</sub> para o mês de agosto (seção 5.3). Essa característica da área de estudo influencia no tempo de disponibilidade das vazões de CH<sub>4</sub> no aterro e resulta na diminuição da potência dos grupos geradores, capaz de ser aferida com o uso do “Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal”.

## 5.5 ESTIMATIVA DAS EMISSÕES EVITADAS DE CO<sub>2eq</sub>

A operação de cada um dos grupos geradores, em seus respectivos cenários, converte o CH<sub>4</sub> em CO<sub>2</sub> biogênico em diferentes proporções relacionadas às potências e os tempos de disponibilidade de cada grupo. A aplicação do Potencial de Aquecimento Global de 28 kg CO<sub>2</sub> por 1 kg CH<sub>4</sub> para cada cenário, possibilitou a construção da Tabela 17.

Tabela 17 - Quantidades de CO<sub>2eq</sub> evitados.

Cenário	Volume de CH <sub>4</sub> Convertido em Energia [10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ]	CO <sub>2eq</sub> [10 <sup>6</sup> t]
1.1	64,01	1,18
1.2	81,23	1,50
1.3	95,82	1,77
2.1	60,25	1,11
2.2	73,16	1,35
2.3	88,22	1,63

Fonte: Autor do Trabalho.

Os dados revelam que, independentemente do método estudado, conforme se insere maior número de grupos geradores nos cenários avaliados, aumenta o aproveitamento energético do biogás, o que promove aumento das emissões evitadas de CO<sub>2eq</sub>. Esse aumento

resulta em maiores benefícios ambientais, principalmente, na redução do aquecimento global, por meio da redução do lançamento de GEE na atmosfera.

Os resultados chamam a atenção para importância da utilização de sistemas com maiores grupos geradores para mitigação dos problemas relacionados ao aquecimento global. Os aterros são responsáveis por 8% das emissões globais anuais de CH<sub>4</sub>, e somente 12 % do CH<sub>4</sub> gerado nos aterros de todo o mundo é coletado para queima em *flare* ou para uso energético (MØNSTER; KJELDSEN; SCHEUTZ, 2019).

As metas de redução do aquecimento global podem ser atingidas mediante a ampliação do percentual de aterros com aproveitamento energético, bem como o uso intensivo de maiores números de grupos geradores por unidades de aterro. Essa ampliação intensiva demanda maior número de equipamentos e mão de obra qualificada, para isso, é necessário fomentar a cadeia produtiva de aproveitamento energético do CH<sub>4</sub> gerado em aterros.

O fomento dessa cadeia produtiva passa pela capacitação de recursos humano para dimensionamento e operação dos sistemas de aproveitamento energético, bem como o desenvolvimento de uma indústria nacional de equipamentos e insumos. O desenvolvimento dessa indústria é especialmente importante para redução dos custos de importação e melhora da atratividade empresarial para essa atividade.

## 5.6 VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA

Os indicadores econômicos e financeiros da presente pesquisa foram calculados para os seis cenários de motorização, que resultaram num conjunto de seis possibilidades de modelos de negócios para subsidiar as discussões.

Com auxílio das Equações 20 e 21 (seção 4.5), as características do aterro puderam ser quantificadas, conforme Tabela 18.

Tabela 18 - Configuração da célula de aterro que recebem os RSU de Xangri-Lá/RS.

<b>Descrição</b>	<b>Quantidade</b>
Quantidade de RSU recebidos	105 t/dia
Área da célula do aterro sanitário	58.927,96 m <sup>2</sup>
Raio de influência do dreno	20 m
Drenos	47 unidades
Cabeçotes	47 unidades
Queimadores	1 componente
Soprador	1 componente

Fonte: Autor do Trabalho.

Com os dados da Tabela 5 (seção 4.5), foram calculados os custos com investimento do sistema de coleta e queima do biogás, e com os dados da Tabela 7 (seção 4.5), os custos de Operação e Manutenção (O&M). Os resultados obtidos foram dispostos na Tabela 19.

Tabela 19 - Custos com sistema de coleta e queima.

<b>Descrição</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade.</b>	<b>Custo com correção da inflação [US\$]</b>
<b>Investimento</b>			
Mobilização da equipe de perfuração e tubulação	1	unidade	23.100,72
Custo de capital instalado de poços verticais de extração de gás	47	poços	253.214,51
Custo de capital instalado de cabeças de poço e sistema de coleta de tubos	47	poços	920.780,02
Custo de capital instalado de soprador e <i>flare</i>	7,98	m <sup>3</sup> / min	165.937,80
Engenharia, licenciamento e levantamento	47	poços	37.914,47
<b>Total de investimento</b>			<b>1.400.947,51</b>
<b>O&amp;M</b>			
Custo anual	47	poços	141.299,51
Uso de eletricidade pelos sopradores	3.776.536,36	m <sup>3</sup>	27.165,93
<b>Total de O&amp;M</b>			<b>168.465,44</b>

Fonte: Autor do Trabalho.

A potência de cada grupo gerador determinou o tipo de tecnologia de conversão por meio do uso da Tabela 4 (seção 4.5). Para as potências instaladas menores que 800 kW, foi adotada a tecnologia de conversão energética baseada em pequenos conjuntos de motores-geradores alternativos. Para potências maiores que 800 kW, a tecnologia escolhida foi de conjuntos de motores-geradores padrão. Os custos com os investimentos foram calculados conforme Tabela 6 (seção 4.5) e os de O&M conforme Tabela 8 (seção 4.5). Os resultados encontrados, juntamente aos custos de reinvestimento, foram dispostos na Tabela 20.

Tabela 20 - Custos de investimento e O&amp;M com os grupos geradores.

<b>Potência do grupo gerador [kW]</b>	<b>Investimento com correção da inflação [US\$]</b>	<b>Reinvestimento [US\$]</b>	<b>O&amp;M com correção da inflação [US\$]</b>
600	1.593.949,39	600.600,00	136.594,53
800	2.760.535,54	800.800,00	182.126,04
900	2.910.690,19	900.900,00	204.891,80
1400	3.661.463,46	1.401.400,00	318.720,58
1700	4.111.927,42	1.701.700,00	387.017,84

Fonte: Autor do Trabalho.

O modelo de negócio adotado neste trabalho prevê a injeção da energia produzida pelos grupos geradores na rede de energia elétrica da concessionária, com o objetivo de compensar toda a demanda de energia elétrica da Prefeitura de Xangri-Lá/RS. O referido consumo está estimado em 8,4 GWh/ano (incluindo a iluminação pública), conforme dados de consumo dos últimos anos obtidos junto à Secretaria de Administração Municipal. A energia necessária para completar a demanda da Prefeitura seria comprada da própria concessionária a uma tarifa de R\$ 0,55 (incluído dos impostos) por kWh (CEEE-D, 2021). A energia excedente seria injetada na rede na forma de créditos para uso até 60 meses após a geração nos meses em que a produção de energia da usina não atingir a demanda da Prefeitura (ANEEL, 2015).

As receitas correspondem à comercialização das RCEs, conforme Equação 23 (seção 4.5), e os valores economizados com a compra de energia da concessionária, no caso de produção da própria energia para suprimento de 100% da demanda, estão avaliados em US\$1.583.622,87 (incluindo a iluminação pública), conforme dados de consumo dos últimos anos.

A estimativa dos valores de investimento, reinvestimento, receitas e despesas, possibilitou a construção dos fluxos de caixa para cada um dos arranjos de potência decorrentes de cada cenário de motorização. O detalhamento dos itens do fluxo de caixa é apresentado no Quadro 8. A organização dos valores nessa sistemática possibilitou o cálculo dos fluxos de caixas descontados, mediante a aplicação da Equação 13 (seção 3.14), conforme apresentado nas Figuras 41 a 46.

Quadro 8 - Especificação dos itens do fluxo de caixa.

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>
Investimentos	Sistemas de coleta e queima
	Sistemas de grupos geradores
Reinvestimentos	Sistemas de grupos geradores
Receitas	Valores economizados com a compra de energia
	Venda de RCEs
Despesas	Compra de energia para suprimento da demanda
	Custos com O&M dos sistemas de coleta e queima
	Custos com O&M dos grupos geradores

Fonte: Autor do Trabalho.

O horizonte de tempo do planejamento do fluxo de caixa correspondeu ao período de 2024 até 2047. Esse período foi arbitrado com base no maior intervalo possível de aproveitamento energético, conforme potência e tempo de disponibilidade das configurações de motorização de cada cenário. O horizonte adotado possibilitou a obtenção de uma

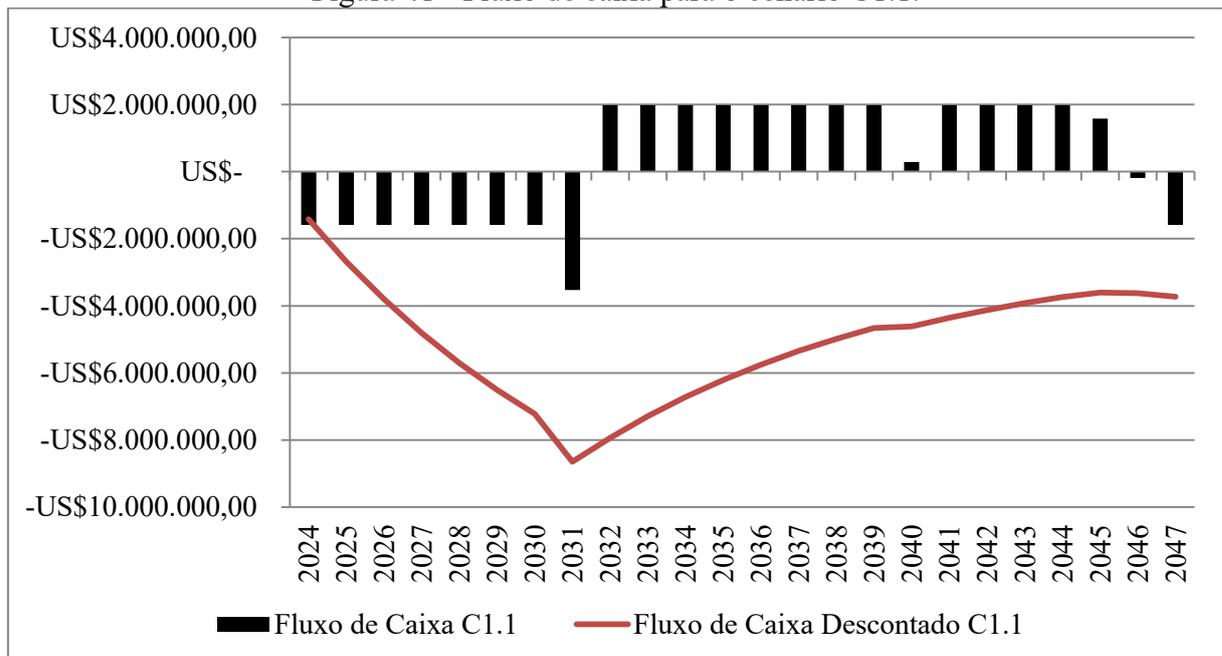
perspectiva fixa e realista para realização e recuperação de investimentos e comparação dos métodos.

Os resultados da Figura 41 demonstram que, os anos de 2024 até 2030 são prejudicados, devido aos sucessivos desembolsos relativos aos custos com a compra de energia elétrica da concessionária. Em 2031, esses custos são somados aos custos de investimentos no grupo gerador e sistemas de coleta e queima de biogás, prejudicando ainda mais a recuperação financeira do empreendimento.

As receitas relativas à economia de energia e à venda de RCEs entre os anos de 2031 e 2044 não foram suficientes para recuperar os custos com os investimentos em 2031, reinvestimento em 2040 e O&M do empreendimento (2031 até 2044). Nos anos de 2045 e 2046, apesar de não haver geração, não havendo, portanto, receitas ou custos de O&M, o empreendimento desfrutou dos benefícios dos créditos de energia excedente injetado na rede da concessionária.

Apesar do gerador usado nesse cenário apresentar uma potência ótima (1.700 kW) para o perfil de geração de CH<sub>4</sub> do aterro, segundo critérios da metodologia usada, o tempo de disponibilidade dessa potência ensejou o início de operação do grupo gerador de forma tardia. As receitas obtidas com o gerador, no modelo de negócio adotado, não foram suficientes para retorno dos investimentos, restando inviável esse cenário nos aspectos econômicos e financeiros.

Figura 41 - Fluxo de caixa para o cenário C1.1.



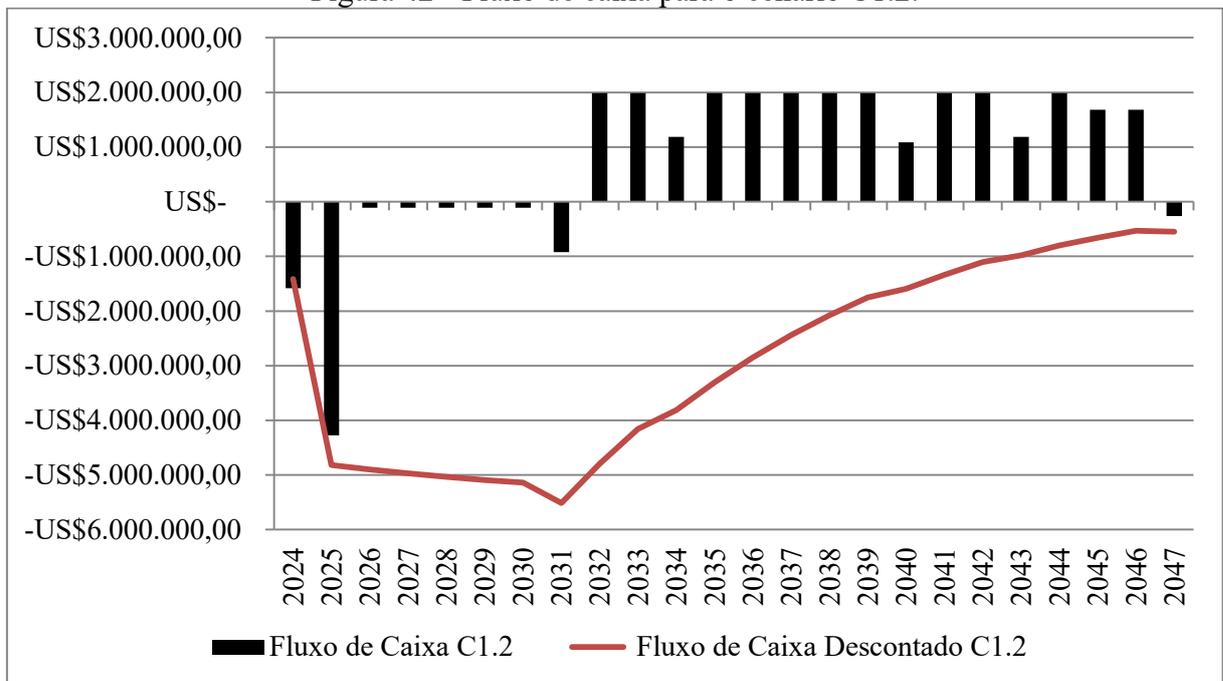
Fonte: Autor do Trabalho.

A análise dos dados da Figura 42 permitiu verificar que no ano de 2024 houve desembolso para compra de energia elétrica. Em 2025 esse custo foi somado aos de investimento com o primeiro grupo gerador de 800 kW e demais sistemas de coleta e queima de biogás, cuja energia gerada foi insuficiente para atender a demanda de energia da Prefeitura. Mesmo com a venda de RCEs, as receitas não superaram as despesas com O&M e compra do saldo de energia. Em 2031 foram feitos investimentos num segundo grupo gerador de 900 kW.

A energia dos dois grupos geradores propiciou receitas ao empreendimento, refletindo em forte alavancagem do fluxo de caixa descontado. Entretanto, os custos de reinvestimento dos dois grupos geradores, sendo o primeiro em 2034 e o segundo em 2040, repesaram a recuperação dos investimentos, restando em inviabilidade econômica e financeira.

Os prejuízos desse cenário poderiam ser maiores se não fossem os benefícios dos créditos de energia excedente injetados na rede da concessionária. Esses foram usufruídos nos anos 2045 e 2046 para compra do saldo de energia para compensar a geração insuficiente do gerador de 800 kW, já que em 2044 o gerador de 900 kW encerrou sua operação, e no ano de 2046 o gerador de 800 kW encerrou a sua.

Figura 42 - Fluxo de caixa para o cenário C1.2.

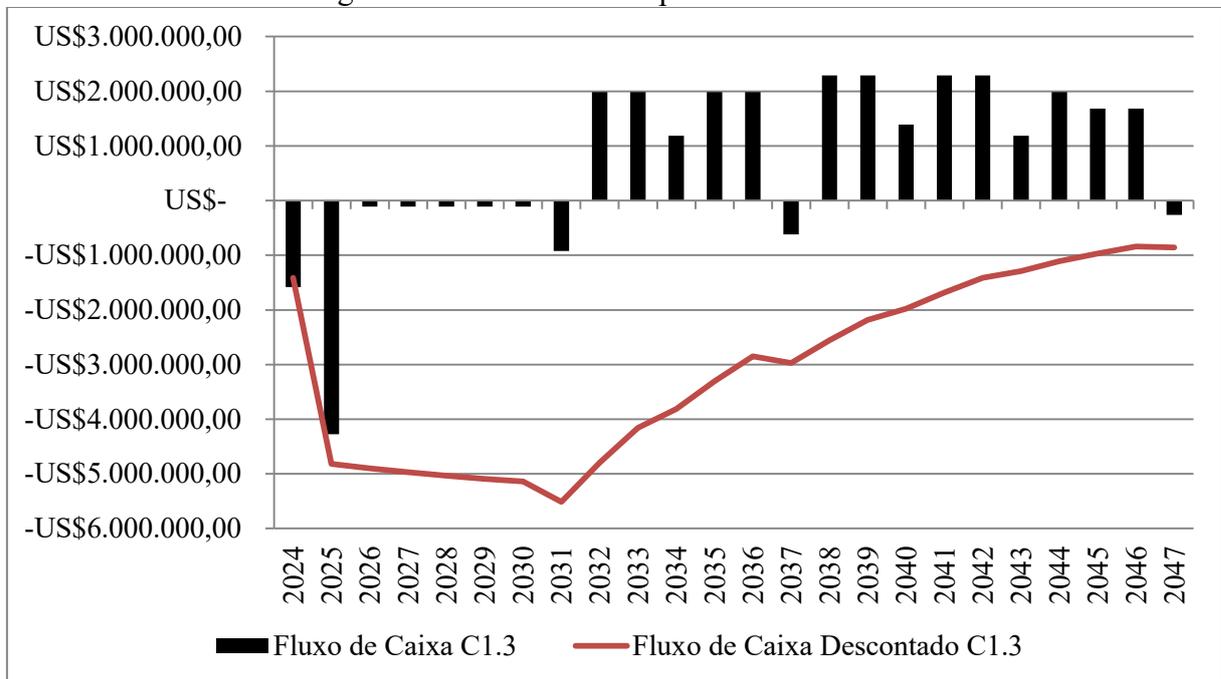


Fonte: Autor do Trabalho.

Assim como no cenário C1.2, o primeiro ano do cenário C1.3, representado pela Figura 43, apresenta apenas o custo com a compra de energia. No segundo ano ocorre o investimento com o primeiro grupo gerador de 800 kW e demais sistemas. As receitas com a geração desse gerador entre os anos de 2025 e 2030 não superam as despesas. Em 2031 é verificado o início de operação do segundo grupo gerador de 900 kW. A geração dos dois grupos promove boa recuperação, que acaba sendo prejudicada com os custos de reinvestimento do motor de 800 kW em 2034.

A entrada do terceiro grupo em 2037, não gerou energia suficiente para a recuperação dos investimentos, principalmente, devido aos elevados custos de reinvestimento para o gerador de 900 kW em 2040 e novamente para o de 800 kW em 2043, por ter completado mais 10 anos de operação. A economia devida ao uso dos créditos de energia excedente injetado na rede da concessionária, nos anos de 2045 e 2046, em razão do fim da operação do gerador de 900 kW em 2044, e do gerador de 800 kW em 2046, foi insuficiente. Assim, o perfil de embolsos e desembolsos do fluxo de caixa do empreendimento, resultou em inviabilidade para esse cenário de motorização.

Figura 43 - Fluxo de caixa para o cenário C1.3.

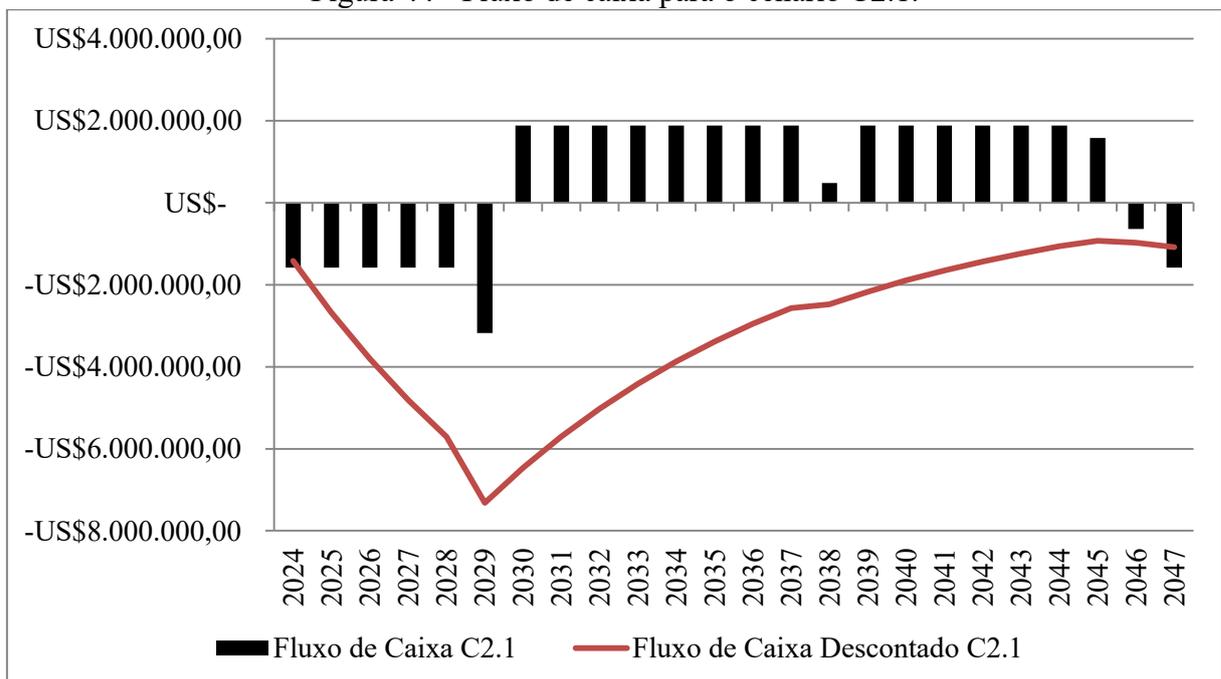


Fonte: Autor do Trabalho.

A análise do fluxo de caixa do cenário C2.1 (Figura 44) permite verificar os sucessivos desembolsos para arcar com os custos de compra de energia entre os anos de 2024

até 2028. Em 2029, somam-se a esses custos, os de investimento no grupo gerador de 1.400 kW e demais sistemas. A energia gerada entre os anos de operação, não superam os custos de O&M de 2029 até 2044, os de reinvestimento em 2038 e os de compra de energia em 2046 e 2047. Mesmo com o uso dos créditos de energia excedente injetado na rede da concessionária em 2045 e 2046, a configuração de motorização do cenário C2.1 não possibilitou a recuperação dos investimentos, restando inviável economicamente.

Figura 44 - Fluxo de caixa para o cenário C2.1.

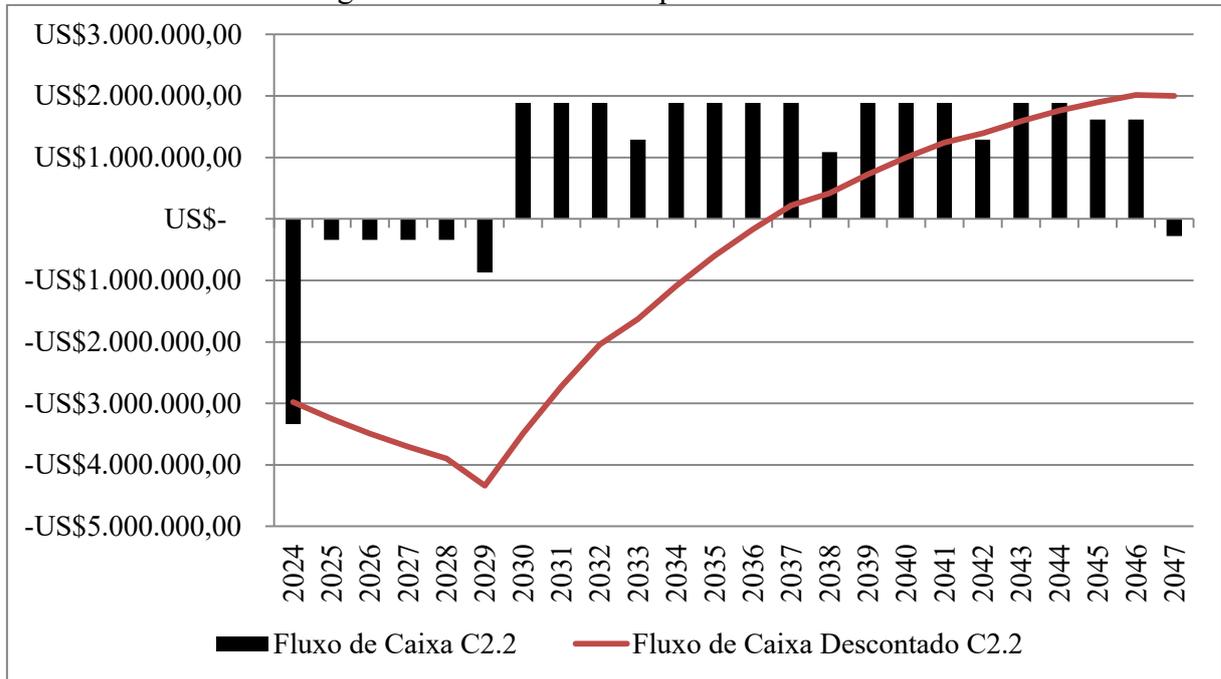


Fonte: Autor do Trabalho.

O modelo de negócio representado pelo fluxo de caixa do cenário C2.2 (Figura 45) tem logo no primeiro ano, o investimento no primeiro grupo gerador de 600 kW e demais sistemas de coleta e queima de biogás. A geração de energia para esse gerador não cobre a demanda da Prefeitura e a venda de RCEs resulta em receitas insuficientes para arcar com os custos da compra do saldo de energia e custos de O&M. Em 2029 entra em operação um segundo grupo gerador de 800 kW. Juntos, geram energia suficiente para economia com compra de energia e venda de RCEs, de tal forma que possibilitam o retorno dos investimentos em 14 anos.

Mesmo com os elevados custos de reinvestimento do gerador de 600 kW em 2033 e 2042, do gerador de 800 kW em 2038, e o fim de sua operação em 2044, o uso dos créditos de energia excedente injetado na rede da concessionária em 2045 e 2046 ajuda na recuperação do investimento, com VLP cerca de US\$2.000.000,00.

Figura 45 - Fluxo de caixa para o cenário C2.2.

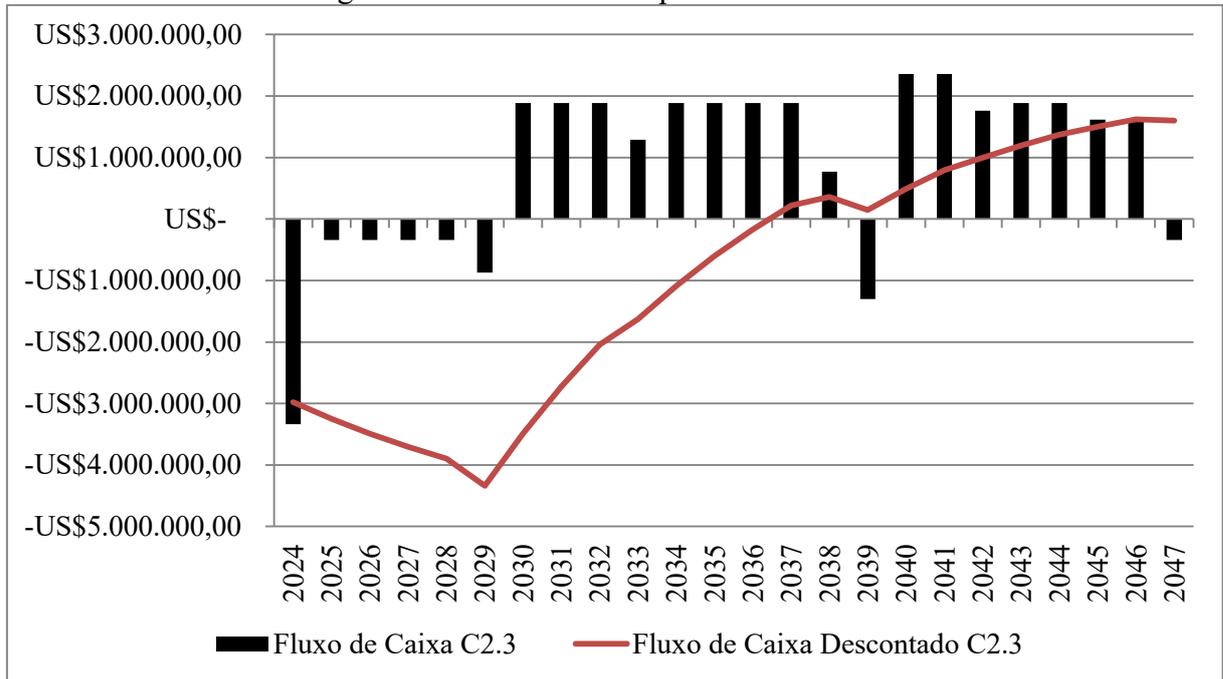


Fonte: Autor do Trabalho.

O cenário C2.3 (Figura 46), tal como o cenário anterior, tem o início da operação do primeiro grupo gerador de 600 kW em 2024. A energia gerada não atende à demanda e os ganhos com a venda de RCEs não superam os custos com investimentos e custos com compra do saldo de energia para atender a demanda. Entre os anos de 2025 e 2028, mesmo sem os custos de investimento, a insuficiência de receitas mantém o fluxo de caixa negativo. Em 2029 inicia-se a operação do segundo grupo gerador de 800 kW. A energia resultante gera receitas capazes de cobrir os custos, inclusive os de reinvestimento do gerador de 600 kW em 2033, possibilitando o retorno dos investimentos em 14 anos.

Mesmo com os elevados custos de reinvestimento no gerador de 800 kW em 2038, de investimento no grupo gerador de 1.400 kW em 2039 e novamente reinvestimento no gerador de 600 kW em 2042, o fluxo de caixa descontado manteve-se positivo. O excedente de energia gerada com o terceiro grupo gerador possibilitou a geração de créditos de energia junto à concessionária, que foram usados para cobrir toda a demanda de energia da Prefeitura em 2045 e 2046 e parte da demanda em 2047. Foi verificada queda na receita com o fim de operação do gerador de 1.400 kW em 2042 e o de 800 kW em 2044, contudo, o cenário C2.3 apresentou VLP de cerca de US\$1.600.000,00.

Figura 46 - Fluxo de caixa para o cenário C2.3.



Fonte: Autor do Trabalho.

Por meio do uso das Equações 14 e 15, os demais indicadores econômicos e financeiros, foram calculados e relacionados na Tabela 21.

Tabela 21 - Indicadores econômicos e financeiros.

Cenário	VPL [US\$]	TIR [%]	LCOE [US\$/MWh]	Payback [anos]
1.1	-3.725.086,93	5,33%	103,02	-
1.2	-551.217,52	10,98%	135,68	-
1.3	-860.555,65	10,39%	134,01	-
2.1	-1.079.653,26	9,90%	108,72	-
2.2	1.998.274,15	16,34%	144,79	14
2.3	1.601.169,50	15,64%	144,04	14

Fonte: Autor do Trabalho.

Dentre as alternativas estudadas, o VPL apresentou positivo apenas para os cenários C2.2 e C2.3, com 14 anos para retorno dos investimentos. Apesar do cenário C2.3 apresentar custos com investimento para instalação de três grupos de geradores em relação ao cenário C2.2, com dois grupos, a energia excedente produzida compensou o incremento dos custos.

A TIR apresentou rendimentos muito parecidos para os cenários com VLP positivo, em torno de 16%. Dessa forma, o cenário indicado para implantação é o C2.3, pois possui maior aproveitamento energético (68%) e, conseqüentemente, evita menores quantidades de

GEE lançados à atmosfera ( $1,63 \cdot 10^6$  t CO<sub>2eq</sub>). Além disso, os maiores investimentos na aquisição de equipamentos geram ganhos na cadeia produtiva. Mais equipamentos exigem maiores custos com O&M, demandando, portanto, maiores contratações de mão-de-obra, beneficiando a economia como um todo.

Santos (2015) aplicou, para um aterro hipotético, sua metodologia de motorização e não obteve viabilidade econômica para o cenário de três conjuntos geradores, justificando os resultados nos elevados custos de investimento. Porém, em seu trabalho foi usado apenas os volumes de CH<sub>4</sub> no ano de início até o fim da deposição dos resíduos no aterro e, dessa forma, uma parcela de CH<sub>4</sub> com potencial energético foi desconsiderada. Em seus estudos não foram considerados os custos de reinvestimento para os grupos geradores, também não foram incluídos em suas receitas os ganhos com a venda de RCEs.

Além disso, uma das razões para as diferenças encontradas está no modelo de negócio adotado, que se baseou na venda de energia em leilão de fonte de energia renovável. Dessa forma, a ótica de investimento dos seus estudos foi por parte da iniciativa privada, que não tem em suas despesas, os custos mensais com compra de energia como consumidor cativo.

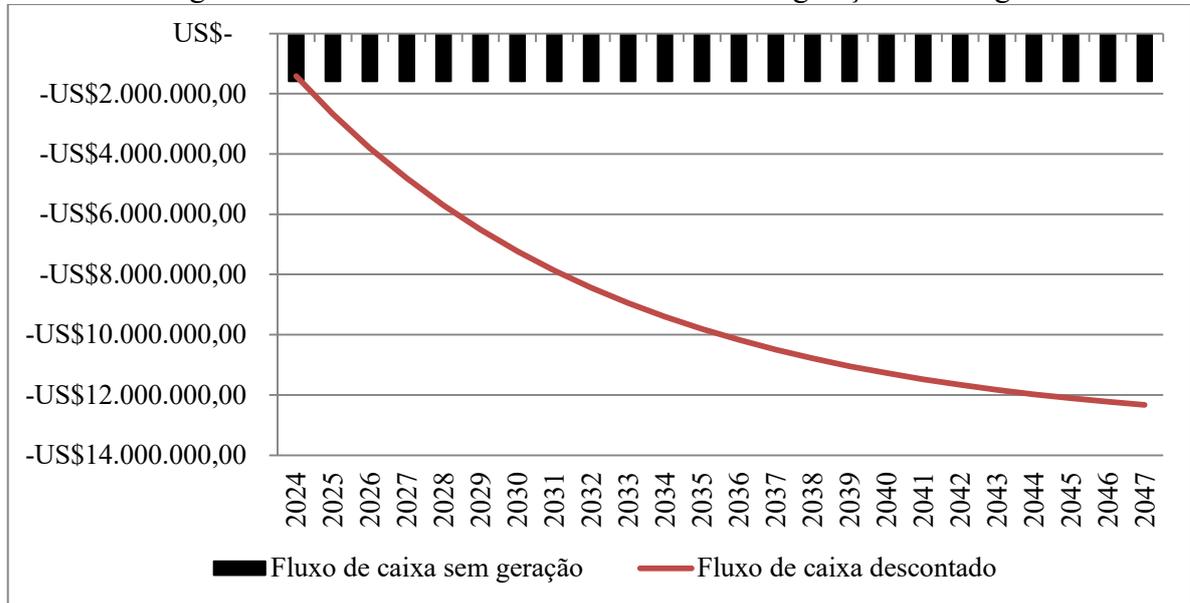
Por outro lado, o modelo de negócio adotado na presente pesquisa, considerou os custos com a compra de energia junto à concessionária para suprimento da demanda da Prefeitura para manter prédios e iluminação pública, bem como a economia de energia decorrente da autoprodução de energia.

O uso do “Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal” reduziu a potência dos grupos geradores e aumentou seus tempos de disponibilidade. Essa característica, associada ao modelo de negócio de compensação de energia e venda de RCEs, foi significativo para o alcance da viabilidade econômica e financeira para os cenários C2.2 e C2.3.

Os resultados demonstraram a efetividade das políticas que viabilizam a compensação de energia no Brasil, no âmbito da Resolução Normativa nº 687/2015 (ANEEL, 2015), bem como as possibilidades de comercialização de RCEs no mercado mundial, no âmbito do MDL.

Sem investimentos em sistemas de geração de energia elétrica para compensação da demanda de energia, A Prefeitura de Xangri-Lá/RS acumulará gastos da ordem de US\$12.327.420,54 (valor presente líquido com desconto de 12%) com energia elétrica, entre os anos de 2024 e 2047 conforme demonstrado na Figura 47.

Figura 47 - Fluxo de caixa sem investimento em geração de energia.



Fonte: Autor do Trabalho.

Mediante o exposto, do ponto de vista econômico, o investimento em qualquer uma das alternativas apresentadas nos cenários de motorização de grupos geradores (mesmo os de VLP negativo), seria benéfico aos cofres públicos municipais, liberando, assim, recursos que seriam destinados ao pagamento da conta de energia elétrica às demais necessidades do município, além de fomentar a cadeia de valor econômico relacionada aos investimentos no setor de aproveitamento energético de biogás de aterro, conforme mencionado. Tal medida contribuiria para redução da tarifa de todos os municípios, pois a geração de energia em todos os cenários contempla a demanda de energia para iluminação pública.

Do ponto de vista ambiental, o investimento na tecnologia proposta no presente trabalho, evitaria o lançamento de GEE na atmosfera, contribuiria com a redução do aquecimento global, aumentaria o uso de energias renováveis. Desse modo, evitaria o uso de fontes poluidoras para atendimento da demanda de energia elétrica, com redução dos impactos ambientais negativos associados aos aterros sanitários. O investimento da forma proposta pode apoiar o país, a atingir seus objetivos na agenda ambiental mundial, ratificada no âmbito do Acordo de Paris em 12 de setembro de 2016.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs um método de previsão de potência elétrica instalada de grupos geradores de conversão térmica do CH<sub>4</sub> decorrente da decomposição dos RSU dispostos em aterro sanitário localizado em região com expressiva sazonalidade na geração de RSU ao longo dos meses do ano, tendo como referência o município de Xangri-Lá/RS. Também foi realizada a análise da viabilidade econômica e financeira de diversos cenários de motorização de grupos geradores que foram comparados com metodologia amplamente utilizada na literatura. A seguir, são descritas as principais conclusões decorrentes da presente investigação.

O estudo do estado da arte sobre o tema relacionado à pesquisa embasou o desenvolvimento do trabalho e possibilitou o entendimento, de forma abrangente, dos principais assuntos que influenciam a geração de CH<sub>4</sub> em aterros e seu aproveitamento energético.

A área de estudo possui dinâmicas populacionais que conferem sazonalidade na geração de RSU, que influenciam na vazão de CH<sub>4</sub> e nos potenciais energéticos. A partir dos resultados da análise gravimétrica, foi possível constatar que o município possui elevado percentual de matéria orgânica em seus resíduos, com valores superiores à média nacional. Observou-se que há uma grande variação sazonal na quantidade de resíduos produzidos, com um aumento expressivo nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, os quais correspondem à alta temporada de turismo de litoral no município.

A estimativa das vazões de CH<sub>4</sub> decorrente da decomposição dos RSU oriundos do município de Xangri-Lá/RS foi obtida em termos anuais com um modelo computacional, comumente, utilizado na literatura. A estimativa da vazão com periodicidade mensal exigiu sistemática de cálculo diferenciada e tratamento de maior número de dados de geração de resíduos, sendo que a totalização das vazões mensais, ano a ano, foi importante para validação dos resultados. Foi demonstrado que as vazões podem apresentar grandes variações entre os meses do ano, principalmente entre os meses de agosto e janeiro.

O potencial de geração de energia elétrica disponível na célula de aterro que recebe os RSU de Xangri-Lá/RS foi estimado a partir da relação direta entre a vazão de CH<sub>4</sub>, seu poder calorífico e a eficiência dos diferentes sistemas de coleta e conversão energética do biogás. A parametrização das curvas de potência em relação ao tempo foi importante para obtenção das variáveis de entrada das diferentes metodologias estudadas.

A estimativa do potencial de geração de energia elétrica instalada de grupos geradores com o Método Escalonado para Motorização, descrito na literatura, foi realizada por meio do uso de dados de vazões de CH<sub>4</sub> com periodicidade anual, mediante a adoção de três cenários de motorização. O uso dessa metodologia ensejou a obtenção de potenciais mais elevados de grupos geradores com tempos de disponibilidades menores, quando comparados aos resultados obtidos com o “Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal” proposto neste trabalho.

A estimativa do potencial de geração de energia elétrica de grupos geradores por meio do “Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal” foi feita com os dados de vazão obtidos com periodicidade mensal. Os cálculos foram realizados para três cenários de motorização, de forma análoga à usada no Método Escalonado para Motorização, para viabilizar a comparação das metodologias. Os resultados demonstraram que os potenciais mais elevados ocorrem com um menor tempo de disponibilidade, sendo que os menores potenciais ocorrem na maior parte do tempo. Dessa forma, o uso do “Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal” ensejou a obtenção de potenciais mais baixos para os grupos geradores, com tempo de disponibilidade maior.

As emissões evitadas de CO<sub>2eq</sub> em decorrência do aproveitamento energético do CH<sub>4</sub>, apresentaram diferenças relacionadas às configurações de potência e tempo de operação dos grupos geradores em seus respectivos cenários. Os resultados revelaram que o benefício ambiental relacionado a emissões evitadas de CO<sub>2eq</sub> aumenta com a inserção de maior número de grupos geradores para ambas as metodologias, com destaque para os cenários com três grupos geradores.

O uso do “Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal” possibilitou o alcance da viabilidade econômica e financeira em dois cenários com mais de um grupo gerador. O cenário com dois grupos geradores apresentou melhores indicadores econômicos e financeiros, e o cenário com três grupos geradores, o melhor desempenho ambiental. Esses resultados estão associados aos elevados custos de investimento e reinvestimento dos grupos geradores. A proximidade dos valores dos indicadores econômicos e financeiros para esses dois cenários ensejou a escolha do cenário com três geradores como melhor opção de investimento, devido ao seu desempenho ambiental.

Foi demonstrado que o investimento em qualquer uma das alternativas apresentadas nos cenários de motorização de grupos geradores, seria benéfico aos cofres públicos municipais, devido aos elevados custos com aquisição de energia elétrica pelo município no

período estudado. O investimento na configuração tecnológica proposta, com o uso do “Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal”, é capaz de gerar receitas para a Prefeitura de Xangri-Lá/RS, contribuindo com a redução do aquecimento global e apoio ao país a atingir seus objetivos na agenda ambiental mundial.

Pesquisas complementares podem ser propostas para um maior aprofundamento dos estudos voltados ao aproveitamento energético do CH<sub>4</sub> em aterros sanitários. Algumas perspectivas podem ser apontadas, as quais incluem:

- Estudos de caracterização qualitativa e quantitativa dos RSU de Xangri-Lá/RS;
- Estudos dos parâmetros de entrada dos modelos de previsão de CH<sub>4</sub> em aterro sanitário;
- Aplicação do “Método de Previsão de Potência em Ambiente Sazonal” em outras localidades;
- A análise da viabilidade técnica e econômica para outros modelos de negócio;
- A consideração de consórcios intermunicipais para estudos de viabilidade;
- A consideração de parcerias público-privadas para estudos de viabilidade;
- Estudos da cadeia de insumos e equipamentos para fins de aproveitamento energético do biogás gerado em aterro sanitário no contexto nacional.

## REFERÊNCIAS

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13.896**: Aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10.004**: Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10.520** - Informação e documentação - Citações em documentos. Rio de Janeiro, 2002.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15.849**: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, 2010.
- ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza e Resíduos Sólidos). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2008**. São Paulo, 2009.
- \_\_\_\_\_. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2009**. São Paulo, 2010.
- \_\_\_\_\_. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2010**. São Paulo, 2011.
- \_\_\_\_\_. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2011**. São Paulo, 2012.
- \_\_\_\_\_. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2012**. São Paulo, 2013.
- \_\_\_\_\_. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2013**. São Paulo, 2014.
- \_\_\_\_\_. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2014**. São Paulo, 2015.
- \_\_\_\_\_. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2016**. São Paulo, 2017.
- \_\_\_\_\_. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil – 2018/2019**. São Paulo, 2019.
- ABRELPE; PLASTIVIDA. **Caderno informativo sobre recuperação energética de resíduos sólidos urbanos**. São Paulo, 2012.
- ALMEIDA, N. *et al.* **Educação ambiental**: a conscientização sobre o destino de resíduos sólidos, o desperdício de água e o de alimentos no município de Cametá/PA. Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos, v. 100, n. 255, p. 481–500, 2019.
- ALVARES, C. A. *et al.* **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVES, J. W. S. **Cenários quantitativos de energia e gases de efeito estufa pela gestão de resíduos na Macrometrópole Paulista**, 2017, 268 p. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Energia - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasil, 2012.

\_\_\_\_\_. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Brasil, 2015.

AYODELE, T. R.; ALAO, M. A.; OGUNJUYIGBE, A. S. O. **Effect of collection efficiency and oxidation factor on greenhouse gas emission and life cycle cost of landfill distributed energy generation**. *Sustainable Cities and Society*, v. 52, n. September 2019, 2020.

BAIRD, C.; CANN, M. **Resíduos, solos e sedimentos**. In: BAIRD, Colin; CANN, Michael. *Química Ambiental*. 4. ed. Porto Alegre, 2011.

BARRAK, É. **Análise técnica e econômica da recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos através da incineração e do gás de aterro sanitário**, 2018, 138p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal De Itajubá, Itajubá, 2018.

BCB (Banco Central do Brasil). **Índices de cotações de moedas**. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/>>. Acesso em: 21 maio. 2021.

BRASIL. **Lei Federal Nº 12.305/2010, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial de União, Brasília, DF*. 02 de agosto de 2010.

\_\_\_\_\_. **Lei Federal Nº 14.026/2020, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico; e dá outras providências. *Diário Oficial de União, Brasília, DF*. 16 de julho de 2020.

CALDERONI, S. **Os bilhões perdidos no lixo**. 4. ed. São Paulo: Humanistas, 2003.

CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

CANCLINI, N. G. **Culturas híbridas: Estratégias para entrar e sair da modernidade**. São Paulo: USP, 2006.

CEEE-D (Companhia Estadual de Energia Elétrica – Distribuição). **Tarifas e custos dos serviços**. Disponível em: <[http://www.cee.com.br/pportal/cee/Archives/Upload/Tarifas\\_B-2017-12\\_26152.pdf](http://www.cee.com.br/pportal/cee/Archives/Upload/Tarifas_B-2017-12_26152.pdf)>. Acesso em: 22 mai. 2021.

CEMPRE (Compromisso Empresarial para Reciclagem). **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. 4. ed. São Paulo, 2018.

CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental). **Manual do usuário do programa de computador BIOGAS geração e uso energético em aterros, versão 1.0**. São Paulo, 2006.

CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos). **Química verde no Brasil: 2010 - 2030**. Brasília, 2010.

COELHO, S. T. *et al.* **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**. São Paulo, 2018.

COLTURATO, L. F. D. B. **O estado da arte da tecnologia de metanização seca**. 1ªed. PROBIOGÁS, Ministério das Cidades, Brasília, 2015.

COREDE LITORAL (Conselho Regional de Desenvolvimento do Litoral). **Plano estratégico de desenvolvimento regional 2015 – 2030**: Plano estratégico participativo de desenvolvimento regional do COREDE Litoral do Rio Grande do Sul. Osório, 2017.

DE BRITO, R. C. *et al.* **Municipal solid waste management and economic feasibility for electricity generation from landfill gas and anaerobic reactors in a Brazilian state**. *Environmental Technology and Innovation*, v. 22, p. 101453, 2021.

DEGEN, R. J. **O empreendedor**: empreender como opção de carreira. 4ª ed. São Paulo: Pearson, 2009.

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

DIRECT INDUSTRY. **Unidade de cogeração a biogás 43 - 81 kVA**. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/capstone-turbine/product-22062-116243.html>>. Acesso em: 26 jul. 2020.

DORNELAS, J. **Planos de Negócios exemplos práticos**. 2ª ed. São Paulo: Campus, 2018.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Nota técnica DEA 16/2014**: Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Ministério de Minas e energia, Rio de Janeiro, 2014.

FARQUHAR, G. J.; ROVERS, F. A. **Gas production during refuse decomposition**. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 2, n. 4, p. 483–495, 1973.

FEE (Fundação de Economia e Estatística do Estado do Rio Grande do Sul). **Estimativas para a população flutuante do Litoral Norte do RS**. Disponível em: <<https://www.fee.rs.gov.br/noticias/capao-da-canoa-e-o-municipio-com-maior-populacao-media-no-litoral-norte-durante-o-veraneio/>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Estado do Rio Grande do Sul). **Diretrizes Ambientais para o Desenvolvimento dos Municípios do Litoral Norte**: Cadernos de Planejamento e Gestão Ambiental nº 1. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/programas/zee/>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica** – Estudo de caso. 2011. 147p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

FREIRE, V. H. N. **Estimativa do potencial de produção de biogás em um aterro sanitário para aproveitamento energético**. 2018. 102p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina.

GAVA, T.; FINOTTI, A. R. **Resíduos sólidos urbanos na rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio do meio**. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 1, n. 2, p. 79–101, 2012.

GERMEC. **Grupo de Gerador Biogás (Agronegócio)**. Disponível em: <<http://www.germek.com.br/geracao-de-energia/gkg-grupo-de-gerador-biogas-agronegocio>>. Acesso em: 26 jul. 2020.

GOUVEIA, N. **Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social**. Ciência e Saúde Coletiva, v. 17, n. 6, p. 1503–1510, 2012.

HOOGWYJK, M. *et al.* **Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy**. Biomass and Bioenergy, v. 25, n. 2, p. 119–133, 2003.

HUANG, C. L. *et al.* **Water conservation significance of municipal solid waste management: A case of Xiamen in China**. Journal of Cleaner Production, v. 129, p. 693–703, 2016.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **População de Xangri-Lá/RS**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/xangri-la>>. Acesso em: 12 jul. 2019.  
IEA (International Energy Agency). **Projected Costs of Generating Electricity 2020**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>>. Acesso em: 20 mai. 2020.

IKEDA, D. Y. X. **Análise termodinâmica de Ciclos Rankine Orgânicos integrados a motogeradores a biogás em aterros sanitários**. 2018. 156p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

INVESTING. **Crédito Carbono Futuros - Dez 21 (CFI2Z1)**. Disponível em: <<https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>>. Acesso em: 21 maio. 2021.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. 2006. V.5 - Waste. Disponível em: <[ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html](http://ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html)>. Acesso em: 10 dez. 2019.

\_\_\_\_\_. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2014.

IVAR DO SUL, J. A. *et al.* **Plastic Pollution at a Sea Turtle Conservation Area in NE Brazil: Contrasting Developed and Undeveloped Beaches**. *Estuaries and Coasts*, v. 34, n. 4, p. 814–823, 2011.

JUNGBLUT, M.; PINTO, L. F. S. **Solos do Município de Xangri-Lá, RS**. Porto Alegre: CPRM, 1995.

LIU, S. **How Cells Grow**. In: LIU, S. B. T.-B. E. 2 ed. *Bioprocess Engineering*. Elsevier, 2017. p. 629–697.

MACHADO, S. L. *et al.* **Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results**. *Waste Management*, v. 29, n. 1, p. 153–161, 2009.

MAJDINASAB, A.; ZHANG, Z.; YUAN, Q. **Modelling of landfill gas generation: a review**. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, v. 16, n. 2, p. 361–380, 2017.

MDR.SNS (Ministério do Desenvolvimento Regional Secretaria Nacional de Saneamento). **Fluxo e quantidade de resíduos**. Disponível em: <<http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>>. Acesso em: 26 nov. 2020.

\_\_\_\_\_. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2017**. Brasília, 2019a.

\_\_\_\_\_. **17º Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. Brasília, 2019b.

MMA (Ministério de Minas e Energia). **Aproveitamento Energético do Biogás de Aterro Sanitário**. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario?print=1&tmpl=component>>. Acesso em: 5 ago. 2020.

\_\_\_\_\_. **Nota Técnica nº 10: Estratégias para integração do SISNAMA Brasil**, 2016. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80296/MMA\\_Sisnama\\_Nota\\_Tecnica\\_10\\_2016.pdf](http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80296/MMA_Sisnama_Nota_Tecnica_10_2016.pdf)>

MØNSTER, J.; KJELDTSEN, P.; SCHEUTZ, C. **Methodologies for measuring fugitive methane emissions from landfills – A review**. *Waste Management*, v. 87, p. 835–859, 2019.

MORAES, R. **Revisão sistemática**. Araranguá: UFSC, 2019. Color.

MYHRE, G.; SHINDELL, D. **Anthropogenic and natural radiative forcing**. In: STOCKER, T.F., D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR, S.K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. B. AND P. M. M. (EDS. ). (Ed.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge ed. New York, USA: United Kingdom and New York, 2013. p. 659–740.

NASCIMENTO, M. C. B. *et al.* **Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, n. 1, p. 143–155, 2019.

NETO, O. P. R. **Modelagem do impacto socioeconômico do tratamento integrado de resíduos sólidos na economia brasileira.** In: TULLIO, L. (Ed.). . Gestão de Resíduos Sólidos. 1. ed. Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. v. 1p. 224.

NOGUEIRA, J. O. C. **Modelo de gestão ecológica para resíduos sólidos urbanos em municípios de pequeno porte no estado do rio grande do sul.** 2000, 195 p., Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

PAVAN, M. D. C. O. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no brasil.** 2010, 187 p., Dissertação de Mestrado, Programa de Pós- Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física), 2010.

PEREIRA, U.; ALEIXO, N. **Os resíduos sólidos urbanos como condicionante de doenças na cidade de Manaus – AM.** Revista Geonorte, v. 9, n. 31, p. 32–53, 2018.

PERELLO, L. F.; DEMOLINER, K. **Legislação e licenciamento ambiental.** Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2017. Color.

PESSOA, M. L. (Org.). **Clima do RS.** In: Atlas FEE. Porto Alegre: FEE, 2017. Disponível em: < <http://atlas.fee.tche.br/rio-grande-do-sul/socioambiental/clima/> >. Acesso em: 30 de dezembro de 2019.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAPÃO DA CANOA. **Plano Municipal de Saneamento Básico,** 2016. Disponível em: <<http://www.capaodacanoa.rs.gov.br/>>

PREFEITURA MUNICIPAL DE IMBÉ. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município do Imbé,** 2013. Disponível em: <<http://www.imbe.rs.gov.br/>>

REGATTIERI, C.R. **Quantificação da Emissão de Biogás em Aterros Sanitário** – Estudo de Caso do Aterro Sanitário de São Carlos. 2009. 137 p., Tese de Doutorado – EESC – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

SANTO, F. **Estimativa do aproveitamento energético do biogás gerado por RSU no Brasil.** 2013. 242p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Energia - EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo, São Paulo 2013.

SANTOS, I. F. S. **Proposta de um método escalonado para a motorização do Aproveitamento do Biogás Gerado por Aterros Sanitários para Fins de Geração de Energia Elétrica.** 2015. 98p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Energia - Universidade Federal de Itajubá, 2015.

SAVI, V. G. **Avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir de biogás produzido na estação de tratamento de esgoto (ETE) Santa Luzia (Criciúma/SC)**. 2019. 94p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade do Campus Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

SCHNEIDER, I.; MAFFESSIONI, D.; BENVENUTI, T. **Educação ambiental e o gerenciamento dos resíduos sólidos da unidade Litoral Norte da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul**. 5o Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 2016.

SILVA, E. R. **Modelagem matemática da produção e transporte de biogás em aterros sanitários**. 2010. 74p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do ABC, 2010.

SILVA, E. R. **Estimativa do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos por diferentes rotas de tratamento**. 2015. 202p. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do ABC, 2015.

SILVA, K. S. DA *et al.* **Educação Ambiental por meio do reaproveitamento do lixo pelos alunos do IFPA**. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 15, n. 3, p. 400–409, 2020.

SILVA, T. R. *et al.* **Methodology for the determination of optimum power of a Thermal Power Plant (TPP) by biogas from sanitary landfill**. Waste Management, v. 65, p. 75–91, 2017.

SILVEIRA, V. C. DA *et al.* **Estudo da temática de viabilidade econômica: Avaliação das publicações apresentadas através dos periódicos Capes entre os anos 2007 a 2016**. I Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação, p. 16, set. 2017.

SILVESTRE, V. V. **Levantamento do potencial de geração de biogás de aterro sanitário para aproveitamento sob a forma de energia elétrica**. 2015. 109p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

SOUSA, F. J. **O alto custo das terras para a implantação dos aterros sanitários**.

Disponível em:

<<https://ferdinandodesousa.wordpress.com/author/ferdinandodesousa/page/16/>>. Acesso em: 21 jul. 2020.

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

SOUZA, S. N. M. **Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural**. Paraná, 2016. Disponível em:

<[http://portalpos.unioeste.br/media/File/vanderleia.schmidt/Manual\\_Geracao\\_Energia\\_Eletrica\\_Biogas.pdf](http://portalpos.unioeste.br/media/File/vanderleia.schmidt/Manual_Geracao_Energia_Eletrica_Biogas.pdf)>.

SPOKAS, K. *et al.* **Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems.** *Waste Management*, v. 26, n. 5, p. 516–525, 2006.

TALAEKHOZANI, A. *et al.* **Evaluation of emission inventory for the emitted pollutants from landfill of Borujerd and modeling of dispersion in the atmosphere.** *Urban Climate*, v. 25, n. June 2017, p. 82–98, 2018.

TCE-RS (Tribunal de Contas do Estado do Rio Grande do Sul). **Orientação técnica serviços de coleta de resíduos sólidos domiciliares: Projeto, contratação e fiscalização.** 2. ed. Porto Alegre, 2019.

TENÓRIO, J. A. S.; ESPINOSA, D. C. R. **Controle ambiental de resíduos.** In: PHILIPPI JUNIOR, A.; ROMÉRO, M. A.; BRUNA, G. C. (Orgs.). *Curso de gestão ambiental.* Barueri, SP: Manole, 2004.

THE WORLD BANK - ESMAP. **Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean.** Ontario, 2004.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** Rio de Janeiro: EPE, 2016.

TOMACHESKI, D. **Estudo de técnicas sustentáveis para a gestão dos resíduos sólidos no município de Imbé, Rio Grande do Sul.** 2014. 114p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). **Guide for methane mitigation projects – Gas to energy at landfills and open dumps.** DRAFT Version 2. Washington, 1996. Disponível em:

<<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.EXE?ZyActionL=Register&User=anonymous&Password=anonymous&Client=EPA&Init=1>>.

\_\_\_\_\_. **Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide.** Washington, 2005.

\_\_\_\_\_. **Landfill Gas Energy Cost Model - User's Manual.** Washington, 2021. Disponível em: <<https://www.epa.gov/lmop/lfgcost-web-landfill-gas-energy-cost-model>>.

VAN EWIJK, S.; STEGEMANN, J. A. **Limitations of the waste hierarchy for achieving absolute reductions in material throughput.** *Journal of Cleaner Production*, v. 132, p. 122–128, 2016.

WORLD BANK. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.** Washington, 2018.

WORLDWIDE INFLATION DATA. **Historic inflation United States - CPI inflation.** Disponível em: <<http://www.inflation.eu/inflation-rates/united-states/historic-inflation/cpi-inflation-united-states.aspx>>. Acesso em: 21 maio. 2021.

## APÊNDICE – FLUXOS DE CAIXA DOS CENÁRIOS ESTUDADOS

Cenário 1.1														
Ano	Potência [kW]	Energia Gerada [GWh]	Saldo de Energia [GWh]	Saldo Acum. de Energia [GWh]	Economia de Energia [US\$]	Compra de energia [US\$]	Venda de crédito de carbono [US\$]	n	Investimento e Reinvestimento	Despesas	Receita	Fluxo de Caixa	FC/(1+i) <sup>n</sup>	Fluxo de Caixa Descontado Σ FC/(1+i) <sup>n</sup>
2024	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87		1		\$ -1.583.622,87	\$ -	\$ -1.583.622,87	\$ -1.413.948,99	\$ -1.413.948,99
2025	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87		2		\$ -1.583.622,87	\$ -	\$ -1.583.622,87	\$ -1.262.454,46	\$ -2.676.403,45
2026	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87		3		\$ -1.583.622,87	\$ -	\$ -1.583.622,87	\$ -1.127.191,48	\$ -3.803.594,93
2027	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87		4		\$ -1.583.622,87	\$ -	\$ -1.583.622,87	\$ -1.006.420,96	\$ -4.810.015,89
2028	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87		5		\$ -1.583.622,87	\$ -	\$ -1.583.622,87	\$ -898.590,15	\$ -5.708.606,04
2029	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87		6		\$ -1.583.622,87	\$ -	\$ -1.583.622,87	\$ -802.312,63	\$ -6.510.918,67
2030	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87		7		\$ -1.583.622,87	\$ -	\$ -1.583.622,87	\$ -716.350,56	\$ -7.227.269,23
2031	1700	13,40	5,00	5,00	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 960.857,78	8	\$ -5.512.874,93	\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ -3.523.877,57	\$ -1.423.235,05	\$ -8.650.504,28
2032	1700	13,40	5,00	10,01	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 960.857,78	9		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 717.252,39	\$ -7.933.251,89
2033	1700	13,40	5,00	15,01	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 960.857,78	10		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 640.403,92	\$ -7.292.847,97
2034	1700	13,40	5,00	20,01	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 960.857,78	11		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 571.789,21	\$ -6.721.058,76
2035	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 960.857,78	12		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 510.526,08	\$ -6.210.532,67
2036	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 960.857,78	13		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 455.826,86	\$ -5.754.705,81
2037	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 960.857,78	14		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 406.988,27	\$ -5.347.717,54
2038	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 960.857,78	15		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 363.382,38	\$ -4.984.335,16
2039	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 960.857,78	16		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 324.448,56	\$ -4.659.886,61
2040	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 960.857,78	17	\$ -1.701.700,00	\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 287.297,37	\$ 41.843,24	\$ -4.618.043,37
2041	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 960.857,78	18		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 258.648,40	\$ -4.359.394,97
2042	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 960.857,78	19		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 230.936,07	\$ -4.128.458,90
2043	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 960.857,78	20		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 206.192,92	\$ -3.922.265,97
2044	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 960.857,78	21		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 184.100,82	\$ -3.738.165,15
2045	0	0	-8,40	11,61	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ -	22			\$ 1.583.622,87	\$ 1.583.622,87	\$ 130.874,57	\$ -3.607.290,58
2046	0	0	-8,40	-1,79		\$ -182.468,08	\$ -	23		\$ -182.468,08	\$ -	\$ -182.468,08	\$ -13.463,95	\$ -3.620.754,53
2047	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87	\$ -	24		\$ -1.583.622,87	\$ -	\$ -1.583.622,87	\$ -104.332,41	\$ -3.725.086,93

Cenário 1.2														
Ano	Potência [kW]	Energia Gerada [GWh]	Saldo de Energia [GWh]	Saldo Acum. de Energia [GWh]	Economia de Energia energia [US\$]	Compra de energia [US\$]	Venda de crédito de carbono [US\$]	n	Investimento e Reinvestimento	Despesas	Receita	Fluxo de Caixa	FC/(1+i) <sup>n</sup>	Fluxo de Caixa Descontado ΣFC/(1+i) <sup>n</sup>
2024	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87	\$ -	1		\$ -1.583.622,87	\$ -	\$ -1.583.622,87	\$ -1.413.948,99	\$ -1.413.948,99
2025	800	6,31	-2,09			\$ -213.144,23	\$ 452.168,37	2	\$ -4.161.483,06	\$ -563.735,71	\$ 452.168,37	\$ -4.273.050,40	\$ -3.406.449,62	\$ -4.820.398,61
2026	800	6,31	-2,09			\$ -213.144,23	\$ 452.168,37	3		\$ -563.735,71	\$ 452.168,37	\$ -111.567,34	\$ -79.411,43	\$ -4.899.810,04
2027	800	6,31	-2,09			\$ -213.144,23	\$ 452.168,37	4		\$ -563.735,71	\$ 452.168,37	\$ -111.567,34	\$ -70.903,06	\$ -4.970.713,11
2028	800	6,31	-2,09			\$ -213.144,23	\$ 452.168,37	5		\$ -563.735,71	\$ 452.168,37	\$ -111.567,34	\$ -63.306,31	\$ -5.034.019,41
2029	800	6,31	-2,09			\$ -213.144,23	\$ 452.168,37	6		\$ -563.735,71	\$ 452.168,37	\$ -111.567,34	\$ -56.523,49	\$ -5.090.542,90
2030	800	6,31	-2,09			\$ -213.144,23	\$ 452.168,37	7		\$ -563.735,71	\$ 452.168,37	\$ -111.567,34	\$ -50.467,40	\$ -5.141.010,30
2031	1700	13,40	5,00	5,00	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	8	\$ -2.910.690,19	\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ -921.692,83	\$ -372.256,28	\$ -5.513.266,58
2032	1700	13,40	5,00	10,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	9		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 717.252,39	\$ -4.796.014,19
2033	1700	13,40	5,00	15,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	10		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 640.403,92	\$ -4.155.610,27
2034	1700	13,40	5,00	20,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	11	\$ -800.800,00	\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.188.197,37	\$ 341.578,35	\$ -3.814.031,92
2035	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	12		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 510.526,08	\$ -3.303.505,84
2036	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	13		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 455.826,86	\$ -2.847.678,98
2037	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	14		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 406.988,27	\$ -2.440.690,71
2038	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	15		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 363.382,38	\$ -2.077.308,33
2039	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	16		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 324.448,56	\$ -1.752.859,77
2040	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	17	\$ -900.900,00	\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.088.097,37	\$ 158.475,22	\$ -1.594.384,55
2041	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	18		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 258.648,40	\$ -1.335.736,15
2042	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	19		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 230.936,07	\$ -1.104.800,07
2043	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	20	\$ -800.800,00	\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.188.197,37	\$ 123.176,58	\$ -981.623,50
2044	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	21		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 184.100,82	\$ -797.522,67
2045	800	6,31	-2,09	17,92	\$ 1.583.622,87		\$ 452.168,37	22		\$ -350.591,49	\$ 2.035.791,24	\$ 1.685.199,75	\$ 139.269,14	\$ -658.253,53
2046	800	6,31	-2,09	10,82	\$ 1.583.622,87		\$ 452.168,37	23		\$ -350.591,49	\$ 2.035.791,24	\$ 1.685.199,75	\$ 124.347,44	\$ -533.906,09
2047	0	0	-8,40	-2,58		\$ -262.763,81	\$ -	24		\$ -262.763,81	\$ -	\$ -262.763,81	\$ -17.311,43	\$ -551.217,52

Cenário 1.3														
Ano	Potência [kW]	Energia [GWh]	Saldo de Energia [GWh]	Saldo Acum. de Energia [GWh]	Economia de Energia energia [US\$]	Compra de energia [US\$]	Venda de crédito de carbono [US\$]	n	Investimento e Reinvestimento	Despesas	Receita	Fluxo de Caixa	FC/(1+i) <sup>n</sup>	Fluxo de Caixa Descontado ΣFC/(1+i) <sup>n</sup>
2024	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87	\$ -	1		\$ -1.583.622,87	\$ -	\$ -1.583.622,87	\$ -1.413.948,99	\$ -1.413.948,99
2025	800	6,31	-2,09			\$ -213.144,23	\$ 452.168,37	2	\$ -4.161.483,06	\$ -563.735,71	\$ 452.168,37	\$ -4.273.050,40	\$ -3.406.449,62	\$ -4.820.398,61
2026	800	6,31	-2,09			\$ -213.144,23	\$ 452.168,37	3		\$ -563.735,71	\$ 452.168,37	\$ -111.567,34	\$ -79.411,43	\$ -4.899.810,04
2027	800	6,31	-2,09			\$ -213.144,23	\$ 452.168,37	4		\$ -563.735,71	\$ 452.168,37	\$ -111.567,34	\$ -70.903,06	\$ -4.970.713,11
2028	800	6,31	-2,09			\$ -213.144,23	\$ 452.168,37	5		\$ -563.735,71	\$ 452.168,37	\$ -111.567,34	\$ -63.306,31	\$ -5.034.019,41
2029	800	6,31	-2,09			\$ -213.144,23	\$ 452.168,37	6		\$ -563.735,71	\$ 452.168,37	\$ -111.567,34	\$ -56.523,49	\$ -5.090.542,90
2030	800	6,31	-2,09			\$ -213.144,23	\$ 452.168,37	7		\$ -563.735,71	\$ 452.168,37	\$ -111.567,34	\$ -50.467,40	\$ -5.141.010,30
2031	1700	13,40	5,00	5,00	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	8	\$ -2.910.690,19	\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ -921.692,83	\$ -372.256,28	\$ -5.513.266,58
2032	1700	13,40	5,00	10,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	9		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 717.252,39	\$ -4.796.014,19
2033	1700	13,40	5,00	15,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	10		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 640.403,92	\$ -4.155.610,27
2034	1700	13,40	5,00	20,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	11	\$ -800.800,00	\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.188.197,37	\$ 341.578,35	\$ -3.814.031,92
2035	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	12		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 510.526,08	\$ -3.303.505,84
2036	1700	13,40	5,00	25,01	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	13		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 455.826,86	\$ -2.847.678,98
2037	2600	20,50	12,10	32,11	\$ 1.583.622,87		\$ 1.469.547,19	14	\$ -2.910.690,19	\$ -760.375,08	\$ 3.053.170,06	\$ -617.895,22	\$ -126.433,60	\$ -2.974.112,58
2038	2600	20,50	12,10	39,21	\$ 1.583.622,87		\$ 1.469.547,19	15		\$ -760.375,08	\$ 3.053.170,06	\$ 2.292.794,98	\$ 418.885,07	\$ -2.555.227,51
2039	2600	20,50	12,10	46,30	\$ 1.583.622,87		\$ 1.469.547,19	16		\$ -760.375,08	\$ 3.053.170,06	\$ 2.292.794,98	\$ 374.004,53	\$ -2.181.222,98
2040	2600	20,50	12,10	53,40	\$ 1.583.622,87		\$ 1.469.547,19	17	\$ -900.900,00	\$ -760.375,08	\$ 3.053.170,06	\$ 1.391.894,98	\$ 202.721,63	\$ -1.978.501,36
2041	2600	20,50	12,10	60,49	\$ 1.583.622,87		\$ 1.469.547,19	18		\$ -760.375,08	\$ 3.053.170,06	\$ 2.292.794,98	\$ 298.154,12	\$ -1.680.347,24
2042	2600	20,50	12,10	60,49	\$ 1.583.622,87		\$ 1.469.547,19	19		\$ -760.375,08	\$ 3.053.170,06	\$ 2.292.794,98	\$ 266.209,04	\$ -1.414.138,20
2043	1700	13,40	5,00	53,40	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	20	\$ -800.800,00	\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.188.197,37	\$ 123.176,58	\$ -1.290.961,63
2044	1700	13,40	5,00	46,30	\$ 1.583.622,87		\$ 960.857,78	21		\$ -555.483,28	\$ 2.544.480,65	\$ 1.988.997,37	\$ 184.100,82	\$ -1.106.860,80
2045	800	6,31	-2,09	32,11	\$ 1.583.622,87		\$ 452.168,37	22		\$ -350.591,49	\$ 2.035.791,24	\$ 1.685.199,75	\$ 139.269,14	\$ -967.591,66
2046	800	6,31	-2,09	17,92	\$ 1.583.622,87		\$ 452.168,37	23		\$ -350.591,49	\$ 2.035.791,24	\$ 1.685.199,75	\$ 124.347,44	\$ -843.244,22
2047	0	0	-8,40	-2,58		\$ -262.763,81	\$ -	24		\$ -262.763,81	\$ -	\$ -262.763,81	\$ -17.311,43	\$ -860.555,65

Cenário 2.1														
Ano	Potência [kW]	Energia [GWh]	Saldo de Energia [GWh]	Saldo Acum. de Energia [GWh]	Economia de Energia energia [US\$]	Compra de energia [US\$]	Venda de crédito de carbono [US\$]	n	Investimento e Reinvestimento	Despesas	Receita	Fluxo de Caixa	FC/(1+i) <sup>n</sup>	Fluxo de Caixa Descontado ΣFC/(1+i) <sup>n</sup>
2024	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87		1		\$ -1.583.622,87		\$ -1.583.622,87	\$ -1.413.948,99	\$ -1.413.948,99
2025	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87		2		\$ -1.583.622,87		\$ -1.583.622,87	\$ -1.262.454,46	\$ -2.676.403,45
2026	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87		3		\$ -1.583.622,87		\$ -1.583.622,87	\$ -1.127.191,48	\$ -3.803.594,93
2027	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87		4		\$ -1.583.622,87		\$ -1.583.622,87	\$ -1.006.420,96	\$ -4.810.015,89
2028	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87		5		\$ -1.583.622,87		\$ -1.583.622,87	\$ -898.590,15	\$ -5.708.606,04
2029	1400	11,04	2,64	2,64	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	6	\$ -5.062.410,97	\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ -3.174.679,48	\$ -1.608.391,42	\$ -7.316.997,46
2030	1400	11,04	2,64	5,28	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	7		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 853.913,86	\$ -6.463.083,60
2031	1400	11,04	2,64	7,91	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	8		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 762.423,09	\$ -5.700.660,51
2032	1400	11,04	2,64	10,55	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	9		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 680.734,90	\$ -5.019.925,61
2033	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	10		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 607.799,02	\$ -4.412.126,59
2034	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	11		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 542.677,70	\$ -3.869.448,90
2035	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	12		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 484.533,66	\$ -3.384.915,24
2036	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	13		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 432.619,34	\$ -2.952.295,90
2037	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	14		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 386.267,26	\$ -2.566.028,64
2038	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	15	\$ -1.401.400,00	\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 486.331,49	\$ 88.850,95	\$ -2.477.177,69
2039	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	16		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 307.929,90	\$ -2.169.247,80
2040	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	17		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 274.937,41	\$ -1.894.310,39
2041	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	18		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 245.479,83	\$ -1.648.830,56
2042	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	19		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 219.178,42	\$ -1.429.652,14
2043	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	20		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 195.695,02	\$ -1.233.957,12
2044	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	21		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 174.727,69	\$ -1.059.229,43
2045	0	0	-8,40	2,15	\$ 1.583.622,87			22			\$ 1.583.622,87	\$ 1.583.622,87	\$ 130.874,57	\$ -928.354,86
2046	0	0	-6,25			\$ -636.499,50		23		\$ -636.499,50	\$ -	\$ -636.499,50	\$ -46.966,00	\$ -975.320,85
2047	0	0	-8,40			\$ -1.583.622,87		24		\$ -1.583.622,87	\$ -	\$ -1.583.622,87	\$ -104.332,41	\$ <b>-1.079.653,26</b>

Cenário 2.2														
Ano	Potência [kW]	Energia [GWh]	Saldo de Energia [GWh]	Saldo Acum. de Energia [GWh]	Economia de energia [US\$]	Compra de energia [US\$]	Venda de crédito de carbono [US\$]	n	Investimento e Reinvestimento	Despesas	Receita	Fluxo de Caixa	FC/(1+i) <sup>n</sup>	Fluxo de Caixa Descontado ΣFC/(1+i) <sup>n</sup>
2024	600	4,73	-3,67			\$ -373.735,69	\$ 339.126,27	1	\$ -2.994.896,91	\$ -678.795,66	\$ 339.126,27	\$ -3.334.566,30	\$ -2.977.291,34	\$ -2.977.291,34
2025	600	4,73	-3,67			\$ -373.735,69	\$ 339.126,27	2		\$ -678.795,66	\$ 339.126,27	\$ -339.669,39	\$ -270.782,36	\$ -3.248.073,69
2026	600	4,73	-3,67			\$ -373.735,69	\$ 339.126,27	3		\$ -678.795,66	\$ 339.126,27	\$ -339.669,39	\$ -241.769,96	\$ -3.489.843,66
2027	600	4,73	-3,67			\$ -373.735,69	\$ 339.126,27	4		\$ -678.795,66	\$ 339.126,27	\$ -339.669,39	\$ -215.866,04	\$ -3.705.709,69
2028	600	4,73	-3,67			\$ -373.735,69	\$ 339.126,27	5		\$ -678.795,66	\$ 339.126,27	\$ -339.669,39	\$ -192.737,53	\$ -3.898.447,23
2029	1400	11,04	2,64	2,64	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	6	\$ -2.760.535,54	\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ -872.804,05	\$ -442.189,69	\$ -4.340.636,92
2030	1400	11,04	2,64	5,28	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	7		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 853.913,86	\$ -3.486.723,06
2031	1400	11,04	2,64	7,91	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	8		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 762.423,09	\$ -2.724.299,97
2032	1400	11,04	2,64	10,55	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	9		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 680.734,90	\$ -2.043.565,07
2033	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	10	\$ -600.600,00	\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.287.131,49	\$ 414.421,89	\$ -1.629.143,18
2034	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	11		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 542.677,70	\$ -1.086.465,48
2035	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	12		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 484.533,66	\$ -601.931,82
2036	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	13		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 432.619,34	\$ -169.312,49
2037	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	14		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 386.267,26	\$ 216.954,78
2038	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	15	\$ -800.800,00	\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.086.931,49	\$ 198.578,32	\$ 415.533,10
2039	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	16		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 307.929,90	\$ 723.463,00
2040	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	17		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 274.937,41	\$ 998.400,40
2041	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	18		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 245.479,83	\$ 1.243.880,23
2042	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	19	\$ -600.600,00	\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.287.131,49	\$ 149.444,69	\$ 1.393.324,92
2043	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	20		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 195.695,02	\$ 1.589.019,94
2044	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 791.294,64	21		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 174.727,69	\$ 1.763.747,63
2045	600	4,73	-3,67	6,88	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 339.126,27	22		\$ -305.059,97	\$ 1.922.749,15	\$ 1.617.689,17	\$ 133.689,89	\$ 1.897.437,53
2046	600	4,73	-3,67	0,57	\$ 1.583.622,87	\$ -	\$ 339.126,27	23		\$ -305.059,97	\$ 1.922.749,15	\$ 1.617.689,17	\$ 119.365,98	\$ 2.016.803,51
2047	600	4,73	-3,10			\$ -315.316,57	\$ 339.126,27	24		\$ -620.376,55	\$ 339.126,27	\$ -281.250,27	\$ -18.529,36	\$ <b>1.998.274,15</b>

Cenário 2.3														
Ano	Potência [kW]	Energia [GWh]	Saldo de Energia [GWh]	Saldo Acum. de Energia [GWh]	Economia de Energia [US\$]	Compra de energia [US\$]	Venda de crédito de carbono [US\$]	n	Investimento e Reinvestimento	Despesas	Receita	Fluxo de Caixa	FC/(1+i) <sup>n</sup>	Fluxo de Caixa Descontado ΣFC/(1+i) <sup>n</sup>
2024	600	4,73	-3,67			\$ -373.735,69	\$ 339.126,27	1	\$ -2.994.896,91	\$ -678.795,66	\$ 339.126,27	\$ -3.334.566,30	\$ -2.977.291,34	\$ -2.977.291,34
2025	600	4,73	-3,67			\$ -373.735,69	\$ 339.126,27	2		\$ -678.795,66	\$ 339.126,27	\$ -339.669,39	\$ -270.782,36	\$ -3.248.073,69
2026	600	4,73	-3,67			\$ -373.735,69	\$ 339.126,27	3		\$ -678.795,66	\$ 339.126,27	\$ -339.669,39	\$ -241.769,96	\$ -3.489.843,66
2027	600	4,73	-3,67			\$ -373.735,69	\$ 339.126,27	4		\$ -678.795,66	\$ 339.126,27	\$ -339.669,39	\$ -215.866,04	\$ -3.705.709,69
2028	600	4,73	-3,67			\$ -373.735,69	\$ 339.126,27	5		\$ -678.795,66	\$ 339.126,27	\$ -339.669,39	\$ -192.737,53	\$ -3.898.447,23
2029	1400	11,04	2,64	2,64	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	6	\$ -2.760.535,54	\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ -872.804,05	\$ -442.189,69	\$ -4.340.636,92
2030	1400	11,04	2,64	5,28	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	7		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 853.913,86	\$ -3.486.723,06
2031	1400	11,04	2,64	7,91	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	8		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 762.423,09	\$ -2.724.299,97
2032	1400	11,04	2,64	10,55	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	9		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 680.734,90	\$ -2.043.565,07
2033	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	10	\$ -600.600,00	\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.287.131,49	\$ 414.421,89	\$ -1.629.143,18
2034	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	11		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 542.677,70	\$ -1.086.465,48
2035	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	12		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 484.533,66	\$ -601.931,82
2036	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	13		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 432.619,34	\$ -169.312,49
2037	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	14		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 386.267,26	\$ 216.954,78
2038	1400	11,04	2,64	13,19	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	15	\$ -800.800,00	\$ -805.906,59	\$ 2.374.917,51	\$ 768.210,92	\$ 140.349,26	\$ 357.304,04
2039	2800	22,08	13,68	24,23	\$ 1.583.622,87		\$ 1.582.589,28	16	\$ -3.661.463,46	\$ -805.906,59	\$ 3.166.212,15	\$ -1.301.157,90	\$ -212.247,04	\$ 145.057,00
2040	2800	22,08	13,68	35,26	\$ 1.583.622,87		\$ 1.582.589,28	17		\$ -805.906,59	\$ 3.166.212,15	\$ 2.360.305,56	\$ 343.765,15	\$ 488.822,15
2041	2800	22,08	13,68	46,30	\$ 1.583.622,87		\$ 1.582.589,28	18		\$ -805.906,59	\$ 3.166.212,15	\$ 2.360.305,56	\$ 306.933,17	\$ 795.755,32
2042	2800	22,08	13,68	57,34	\$ 1.583.622,87		\$ 1.582.589,28	19	\$ -600.600,00	\$ -805.906,59	\$ 3.166.212,15	\$ 1.759.705,56	\$ 204.313,74	\$ 1.000.069,06
2043	1400	11,04	2,64	57,34	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	20		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 195.695,02	\$ 1.195.764,07
2044	1400	11,04	2,64	46,30	\$ 1.583.622,87		\$ 791.294,64	21		\$ -487.186,02	\$ 2.374.917,51	\$ 1.887.731,49	\$ 174.727,69	\$ 1.370.491,77
2045	600	4,73	-3,67	28,96	\$ 1.583.622,87		\$ 339.126,27	22		\$ -305.059,97	\$ 1.922.749,15	\$ 1.617.689,17	\$ 133.689,89	\$ 1.504.181,66
2046	600	4,73	-3,67	11,61	\$ 1.583.622,87		\$ 339.126,27	23		\$ -305.059,97	\$ 1.922.749,15	\$ 1.617.689,17	\$ 119.365,98	\$ 1.623.547,64
2047	600	4,73	-3,67	-5,73		\$ -373.735,69	\$ 339.126,27	24		\$ -678.795,66	\$ 339.126,27	\$ -339.669,39	\$ -22.378,13	\$ <b>1.601.169,50</b>