

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE CASCAVEL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS PRODUZIDO EM ATERROS
SANITÁRIOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

VIVIANE CAVALER

CASCAVEL - Paraná - Brasil

Abril 2022.

VIVIANE CAVALER

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS PRODUZIDO EM ATERROS
SANITÁRIOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Tese apresentada como cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de doutora em Engenharia Agrícola, área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Benedito Martins Gomes

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

CASCADEL - Paraná - Brasil

Abril de 2022.

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.¹

Cavaler, Viviane

VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS PRODUZIDO EM ATERROS SANITÁRIOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA / Viviane Cavaler; orientador Benedito Martins Gomes; coorientador Carlos Eduardo Camargo Nogueira. -- Cascavel, 2022.

84 p.

Tese (Doutorado Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2022.

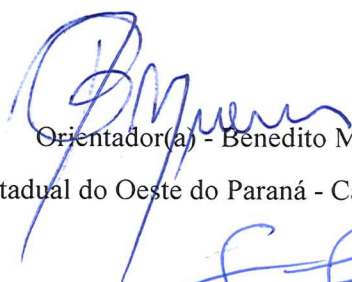
1. resíduos sólidos. 2. fontes renováveis. 3. destinação. 4. viabilidade. I. Martins Gomes, Benedito, orient. II. Camargo Nogueira, Carlos Eduardo, coorient. III. Título.

¹ Revisor de Português, inglês e normas: Prof. Dr. José Carlos da Costa.

VIVIANE CAVALER

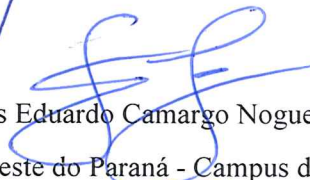
**VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS PRODUZIDO EM
ATERROS SANITÁRIOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, linha de pesquisa Saneamento Ambiental, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Benedito Martins Gomes

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Carlos Eduardo Camargo Nogueira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



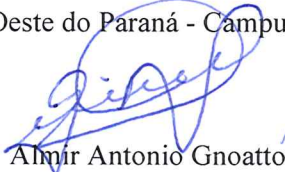
Divair Christ

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Jair Antonio Cruz Siqueira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Almir Antonio Gnoatto

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Cascavel, 19 de abril de 2022.

BIOGRAFIA

Viviane Cavaler, nasceu em 03 de dezembro de 1985, na cidade de Francisco Beltrão–PR. Possui graduação em Licenciatura em Matemática pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Pato Branco, no período de 2003 a 2006. Especialista em Matemática e Física pelo Centro Sulamericano de Ensino Superior – CESUL, período de 2007 a 2008, sob orientação da professora Ms. Rozecler Santin Monegat, cujo Trabalho de Conclusão de Curso foi intitulado: Fontes renováveis de energia - Contribuição do biogás para o desenvolvimento sustentável. Trabalha desde 2007 como servidora pública na UTFPR Campus Dois Vizinhos no cargo de assistente em administração. Já exerceu funções como Assessora de Pesquisa no período de 2010 a 2011 na Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação e Chefe de Gabinete da Direção-Geral do Campus no período de 2015 a 2017. Ingressou como mestrande no primeiro semestre de 2013 no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura (PPGEA), na UNIOESTE Campus Cascavel, sob orientação do Professor Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira, com pesquisa voltada a análise de viabilidade econômica da utilização da vinhaça para a geração de energia elétrica. Ingressou como doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI) na UNIOESTE Campus Cascavel, no primeiro semestre de 2018, orientada pelo professor Dr. Benedito Martins Gomes, e coorientada pelo professor Dr. Carlos Eduardo de Camargo Nogueira, com pesquisa voltada a avaliação econômica da utilização do biogás gerado em aterros sanitários para a produção de energia elétrica.

A minha mãe Arnete, que já se foi,
mas continua sendo minha maior força e
inspiração na vida. Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, o criador supremo, por ter me abençoado, por guiar meus passos para o melhor caminho, por me proteger e conceder forças nos momentos em que quis fraquejar. Só ELE sabe como é importante para mim realizar esse sonho.

A meus pais, Pedro e Arnete, pelo exemplo de honestidade, fé, perseverança, coragem, incentivo e o amor a mim dedicado. Minha mãe, meu maior exemplo e minha maior incentivadora. Você deixou um espaço em minha vida que jamais alguém irá ocupar. Você é o maior motivo para a realização desse sonho. Você sempre será a minha inspiração para a vida. Te amo eternamente! Meu pai, você é a pessoa mais generosa que conheço. Seus gestos sempre me motivaram a seguir em frente e acreditar que devemos ter empatia pelas pessoas. Agradeço por sempre estar ao meu lado, sei que posso contar com você! Te amo!

Aos demais familiares, meu irmão e cunhada, minhas tias, que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste sonho, meu muitíssimo obrigada.

Ao meu namorado Marcelo, agradeço pela compreensão e apoio. Obrigada por me ouvir e me abraçar nos momentos de angústia.

Ao meu orientador, professor Dr. Benedito Martins Gomes pela orientação e ensinamentos, pelo apoio no desenvolvimento do trabalho, pela contribuição com o meu aprendizado e pela amizade.

Ao professor. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira, meu co-orientador, que desde o mestrado se tornou um grande amigo. Obrigada pela orientação, paciência e pelos valiosos conhecimentos repassados durante a realização do trabalho. Serei eternamente grata a tudo o que fez por mim.

Aos colegas que se tornaram amigos, obrigada pelo companheirismo e apoio. Só tenho a agradecer cada um de vocês que fizeram essa caminhada se tornar mais leve e feliz. Anna Paula, Bianca, Neudi e Rosebel, vocês sempre estarão em meu coração. Kathleen, obrigada por abrir as portas de sua casa para mim, foi muito bom esse período de convivência. Plínio, você é uma das melhores pessoas que conheço. Obrigada por me entender, me ouvir e me aconselhar. A amizade que construímos é um presente em minha vida.

A Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Cascavel pelas informações repassadas.

A Companhia Paranaense de Energia – COPEL pela disponibilidade em nos receber.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – *campus* de Dois Vizinhos, por permitir o afastamento para cursar a pós-graduação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da UNIOESTE, *campus* Cascavel, e ao corpo docente e técnico da instituição, pelo aprendizado e pela oportunidade.

Por fim, a todos que estiveram torcendo por mim: muito obrigada!

VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS PRODUZIDO EM ATERROS SANITÁRIOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

RESUMO

Cavaler, Viviane. **Viabilidade econômica da utilização de biogás produzido em aterros sanitários para a geração de energia elétrica**. Orientador: Benedito Martins Gomes; Coorientador: Carlos Eduardo Camargo Nogueira. 2022. 81 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – Paraná, 2022.

Diante do aumento da população e do crescimento desordenado das cidades, a geração e destinação final dos resíduos sólidos urbanos são um problema que vem se agravando e se tornando uma ameaça à saúde pública. Os aterros sanitários são uma das alternativas mais comuns de disposição dos resíduos sólidos urbanos e geram como subproduto, o biogás que apresenta um alto potencial de produção de energia. Todavia, torna-se necessário avaliar a viabilidade econômica para cada situação, em questão de compensação. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi verificar a viabilidade econômica da instalação do sistema de geração de energia em aterros sanitários nas cidades de 30 mil, 100 mil e 250 mil habitantes, a fim incentivar o uso do biogás como fonte de energia renovável. Para tal, foram considerados doze cenários distintos, sendo que os três primeiros contemplaram o aterro municipal de Cascavel - PR e o aproveitamento da energia gerada para compensação junto a Companhia Paranaense de Energia, a partir de 20%, 50% e 80% da capacidade de produção de energia elétrica. Nos demais cenários, consideraram o aproveitamento da energia elétrica para compensação junto à concessionária local, considerando municípios de 30 mil, 100 mil e 250 mil habitantes, avaliando 20%, 50% e 80% da capacidade de geração. Para todos os casos foi considerada a geração dos resíduos sólidos urbanos, conforme a média das massas *per capita* de acordo com as faixas de população do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. O biogás gerado nos aterros foi calculado por meio da análise das faturas de energia elétrica do aterro Municipal de Cascavel no período de janeiro de 2019 a janeiro de 2020 e extrapolado para os demais cenários, considerando que o potencial de geração do biogás corresponde a $75,78 \text{ m}^3\text{CH}_4\text{ton}^{-1}$ e que um metro cúbico de biogás equivale a 1,43 kWh de eletricidade. Admitiu-se que o preço do MWh de energia gerada foi de R\$ 0,5075, valor baseado no grupo tarifário ao qual se encontra a unidade de geração. Ainda, para estimar a potência necessária a ser instalada, foi admitido que o sistema funcione 15 horas diariamente, durante 360 dias no ano. A viabilidade do empreendimento foi calculada utilizando-se o Valor Presente Líquido, a Taxa Interna de Retorno e o Payback descontado. Comparando-se esses indicadores econômicos e as análises realizadas, pode-se concluir que dos 12 cenários avaliados, apenas 2 não se apresentaram viáveis. Os cenários que consideraram o aproveitamento de 20% e 50% da capacidade de aproveitamento de energia em municípios de 30 mil habitantes, não se mostraram viáveis, evidenciando que quanto maior o número de habitantes e o aproveitamento do biogás gerado, maior será o VPL e, consequentemente, a viabilidade do empreendimento. Todos os cenários analisados para o município de Cascavel e os cenários que consideraram o aproveitamento de 50% e 80% da capacidade de geração em municípios de 250 mil habitantes, apresentaram o mesmo payback: 4 anos. O cenário que apresentou menor payback: 3 anos, considerou o aproveitamento de 80% da capacidade de geração de energia em municípios de 100 mil habitantes. Já os cenários que apresentaram maior tempo de retorno, 14 e 15 anos, respectivamente consideraram o aproveitamento de 20% e 80% da energia em municípios de 100 mil e 30 mil habitantes. Os cenários que consideraram 20% e 50% do aproveitamento da geração de energia em municípios de 250 e 100 mil habitantes, respectivamente, apresentaram o payback de 5 anos. A avaliação da viabilidade da instalação do sistema de geração de energia a partir do biogás nos aterros sanitários em municípios de 30 mil, 100 mil e 250 mil habitantes, permitiu elaborar equações

que podem auxiliar a estimar o melhor cenário, dentro das condições peculiares de cada cidade, a fim de contribuir para que a administração pública compreenda a importância da destinação correta dos resíduos sólidos urbanos e a utilize para a geração de energia limpa e sustentável.

Palavras-chave: resíduos sólidos, fontes renováveis, destinação, viabilidade.

ECONOMIC FEASIBILITY OF USING BIOGAS PRODUCED IN SANITARY LANDFILLS FOR ELECTRIC POWER GENERATION

ABSTRACT

Cavaler, Viviane. **Economic feasibility of using biogas produced in sanitary landfills for electric power generation**. Advisor: Benedito Martins Gomes; Co-advisor: Carlos Eduardo Camargo Nogueira. 2022. 81 f. Thesis (PhD Program in Agricultural Engineering) – Western Paraná State University, Cascavel – Paraná, 2022.

Faced with the increase in population and the disorderly growth of cities, the generation and final destination of urban solid waste is a problem that has gradually worsened, becoming a threat to public health. Sanitary landfills are one of the most common alternatives for the disposal of urban solid waste. They generate biogas as a by-product, which has a high potential for energy production. However, it is necessary to evaluate the economic feasibility for each situation, in terms of compensation. Therefore, the objective of this study was to verify the economic feasibility of installing the energy generation system within landfills in cities that have a population of 30 thousand, 100 thousand and 250 thousand inhabitants, in order to stimulate the usage of biogas as a source of renewable energy. On this account, twelve different scenarios were considered, the first three of which contemplated the municipal landfill of Cascavel - PR and the utilization of the generated energy for compensation alongside the Companhia Paranaense de Energia, from 20%, 50% and 80% of the capacity of the electric power generation. On the other hand, the other scenarios considered the utilization of electric energy for compensation alongside the local concessionaire, considering municipalities that have a population of 30 thousand, 100 thousand and 250 thousand inhabitants, evaluating 20%, 50% and 80% of the generation capacity. For all cases, the generation of urban solid waste was considered, in line with the average of the masses per capita according to the population ranges of the National Sanitation Information System. The biogas generated within the landfills was calculated by analyzing the electricity bills of the Cascavel Municipal landfill from January 2019 to January 2020, and extrapolated to the other scenarios, considering that the potential for biogas generation corresponds to $75.78 \text{ m}^3\text{CH}_4 \text{ ton}^{-1}$ and that one cubic meter of biogas is equivalent to 1.43 kWh of electricity. It was presumed that the price per MWh of generated energy was R\$ 0.5075, based on the tariff group to which the generation unit belongs. In addition, in order to estimate the power needed to be installed, it was considered that the system would work 15 hours a day, 360 days a year. The feasibility of the enterprise was calculated by using the Net Present Value, the Internal Rate of Return and the discounted Payback. Comparing these economic indicators and the analyzes that were carried out, it can be concluded that of the 12 scenarios evaluated, only 2 were not viable. The scenarios that considered the utilization of 20% and 50% of the energy utilization capacity in municipalities with a population of 30 thousand inhabitants did not prove to be viable, emphasizing that the greater the number of inhabitants and the utilization of the generated biogas, the greater the NPV and, consequently, the feasibility of the enterprise. All the scenarios analyzed for the municipality of Cascavel and the scenarios that considered the utilization of 50% and 80% of the generation capacity in municipalities with a population of 250 thousand inhabitants presented the same payback: 4 years. The scenario that presented the lowest payback: 3 years, considered the utilization of 80% of the energy generation capacity in municipalities that have a population of 100 thousand inhabitants. On the other hand, the scenarios that presented the longest payback time, 14 and 15 years, respectively, considered the utilization of 20% and 80% of energy in municipalities with a population of 100 thousand and 30 thousand inhabitants. The scenarios that considered 20% and 50% of the utilization of energy generation in municipalities with a population of 250 and 100 thousand inhabitants, respectively, presented a payback of 5 years. The assessment of the feasibility of installing the energy

generation system from biogas in sanitary landfills in municipalities that have a population of 30 thousand, 100 thousand and 250 thousand inhabitants allowed the elaboration of equations that can help to estimate the best scenario, within the idiosyncrasies of each city, in order to contribute when it comes to the public administration understanding the importance of the correct destination of urban solid waste and utilizing it for the generation of clean and sustainable energy.

Keywords: solid waste, renewable sources, destination, feasibility.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Resíduos sólidos	4
3.2 Resíduos sólidos urbanos	5
3.3 Tratamento dos resíduos sólidos.....	9
3.3.1 Reciclagem	9
3.3.2 Compostagem	10
3.3.3 Incineração.....	11
3.4 Destinação final dos resíduos sólidos.....	12
3.4.1 Lixão	14
3.4.2 Aterro controlado.....	14
3.4.3 Aterros sanitários	15
3.4.4 Implantação do aterro sanitário	16
3.5 Geração do biogás	19
3.6 Tecnologias para conversão do biogás em energia.....	22
3.7 Geração distribuída	25
3.8 Avaliação econômica.....	27
3.8.1 Fluxo de caixa	28
3.8.2 Valor presente líquido.....	29
3.8.3 Taxa interna de retorno	29
3.8.4 Taxa mínima de atratividade	29
3.8.5 <i>Payback</i>	30
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4.1 Produção de biogás.....	33
4.2 Caracterização do aterro de Cascavel.....	36
4.3 Geração de energia elétrica	38
4.4 Avaliação econômica.....	40

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1	Análise dos cenários	44
5.1.1	Cenário 1, 2 e 3 – Cascavel	44
5.1.2	Cenário 4, 5 e 6 – municípios com 30 mil habitantes.....	47
5.1.3	Cenário 7, 8 e 9 - municípios com 100 mil habitantes.....	49
5.1.4	Cenário 10, 11 e 12 - Municípios com 250 mil habitantes.....	51
5.2	Comparativo entre todos os cenários (Aterro Municipal de Cascavel, municípios de 30, 100 e 250 mil habitantes)	54
5.3	Método de estimativa da geração de energia e o tempo de retorno do investimento para municípios de 30 até 250 mil habitantes.....	57
6	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Disposição final de RSU nas regiões, por tipo de destinação (T/ano).....	13
Tabela 2	Constituintes típicos encontrados no biogás dos aterros de RSUs	20
Tabela 3	Duração das fases de degradação anaeróbia.....	21
Tabela 4	Massa coletada <i>per capita</i> dos municípios brasileiros em relação à população urbana, segundo faixa populacional	31
Tabela 5	Cenários considerados para a análise de viabilidade econômica	33
Tabela 6	Custos de projeto e instalação de um sistema de conexão micro geração GD para um gerador de 75 kW – Biogás.....	40
Tabela 7	Investimentos para implantação do sistema de captação de biogás no aterro sanitário.....	41
Tabela 8	Percentual destinado a cada unidade consumidora da energia gerada no aterro.....	43
Tabela 9	Dados relativos ao aterro municipal de Cascavel – PR do período de janeiro de 2019 a janeiro de 2020	44
Tabela 10	Dados estimados para os cenários 1, 2 e 3	45
Tabela 11	Dados estimados para os cenários 4, 5 e 6	47
Tabela 12	Dados estimados para os cenários 7, 8 e 9	49
Tabela 13	Dados estimados para os cenários 10, 11 e 12	52
Tabela 14	Valores do investimento inicial, VPL e <i>paybacks</i> de todos os cenários analisados	54
Tabela 15	Potência necessária para a geração da energia elétrica a partir do número de habitantes e da porcentagem do aproveitamento utilizado	58
Tabela 16	Custo total do investimento de acordo com a potência instalada.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Comparação entre a geração de resíduos sólidos urbanos nos anos de 2010 e 2019.	6
Figura 2	Geração de RSU com relação ao PIB (2019-2050).	7
Figura 3	Destinação final dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2020.....	12
Figura 4	Esquema de um aterro sanitário.	17
Figura 5	Tipos de aterro sanitário, quanto à forma de construção. a) Trincheira; b) Superfície/Planar; c) Rampa.....	19
Figura 6	Funcionamento do ciclo a vapor à biogás.....	23
Figura 7	a) Ciclo aberto da turbina a gás; b) Ciclo fechado da turbina a gás.	24
Figura 8	Desenho esquemático das etapas de funcionamento de um motor ciclo Otto. ..	24
Figura 9	Representação de fluxo de caixa.....	28
Figura 10	Aterro municipal de Cascavel – PR.	36
Figura 11	Lagoa aeróbia do Aterro Sanitário Municipal de Cascavel – PR.	37
Figura 12	Lagoa facultativa do Aterro Sanitário Municipal de Cascavel – PR.....	37
Figura 13	a) Drenos verticais de captação do biogás no aterro; b) Canos de condução do biogás até os moto-geradores.	38
Figura 14	Grupos geradores.....	39
Figura 15	Esquema de funcionamento do aterro para a geração de energia.....	39
Figura 16	Valor acumulado dos fluxos de caixa convertidos a valor presente para os cenários 1,2 e 3.	46
Figura 17	Valor acumulado dos fluxos de caixa convertidos a valor presente para os cenários 4, 5 e 6.	48
Figura 18	Valor acumulado dos fluxos de caixa convertidos a valor presente para os cenários 7, 8 e 9.	50
Figura 19	Valor acumulado dos fluxos de caixa convertidos a valor presente para os cenários 10, 11 e 12.	53
Figura 20	Valores do VPL de todos os cenários analisados ao longo da vida útil do empreendimento.....	56

1 INTRODUÇÃO

O crescimento das cidades e o aumento da população, a destinação final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é um problema que vem se agravando diariamente. Resíduos acumulados no meio ambiente de forma inadequada, além de resultarem em problemas ambientais como enchentes, poluição do ar, solo e água, podem ser uma ameaça à saúde pública. De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2021), são coletadas, diariamente, mais de 208.000 toneladas de resíduos sólidos urbanos no Brasil, no entanto, aproximadamente, 6,3 milhões de toneladas deixam de ser coletadas, anualmente, e são destinadas a locais inadequados, gerando problemas de poluição ambiental e danos à saúde pública. De todo o resíduo coletado no país, pouco mais de 60% são dispostos em aterros sanitários, o restante não recebe o tratamento final adequado e é enviado para aterros controlados ou lixões.

Os aterros são uma das maneiras mais comuns de disposição dos RSUs (ZAMORANO et al., 2007; FODOR; KLEMES, 2012; LEME et al., 2014), visto que atendem a normas ambientais, evitando riscos à segurança e à saúde pública, minimizando os impactos ao ambiente e, ainda, apresentam investimento relativamente baixo aos custos de operação e aos requisitos técnicos (HU; DU; LONG, 2017). A partir da degradação microbiana da porção orgânica dos resíduos dispostos nos aterros sanitários, obtém-se o biogás, que possui alto poder calorífico, podendo ser utilizado para a geração de energia. Segundo Di Maria, Desideri e Bidine (2001) e Desideri et al. (2003), a biomassa dos aterros sanitários produz uma quantidade de biogás em torno de $0,350 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ de resíduo sólido urbano.

Em escala mundial, em termos de biogás e aterros sanitários, estima-se uma produção em cerca de $1,1 \text{ TWh.ano}^{-1}$, conforme relatam Ferreira; Moreira e Monteiro (2009), a partir de pesquisa num aterro de Portugal. Moreda (2016), em uma pesquisa realizada no Uruguai, verificou um potencial de produção de biogás de $0,162 \text{ TWh.ano}^{-1}$, considerando a digestão anaeróbica de resíduos agrícolas, esterco animal, vinhaça, lodo de tratamento de efluentes e resíduos sólidos urbanos. No Brasil, Salomon e Lora (2009) estimaram o potencial de geração de energia elétrica a partir de aterros sanitários em 414 MW. Todavia, esse potencial foi estimado considerando que 85% da quantidade total de resíduos gerados são descartados em aterros sanitários. Para Souza et al. (2014), o potencial técnico de geração de energia elétrica a partir de biogás de aterro sanitário, considerando as 16 maiores cidades do Brasil, ficaria em torno de 289 MW. Já Barros, Tiago Filho e Silva (2014) realizaram um estudo mais abrangente, considerando cidades brasileiras com população superior a 200.000 habitantes,

estimaram o potencial de geração de energia elétrica, a partir do biogás de aterros sanitários, entre 420 e 750 MW.

Entretanto, um dos principais problemas enfrentados para a geração de eletricidade a partir do biogás é sua viabilidade econômica. De acordo com Rangel (2016), no Brasil, o custo mínimo de energia produzida a partir de biogás é de 105,3 USD MW.h⁻¹, enquanto a tarifa usada em usinas termelétricas convencionais é de 86,9 USD MW.h⁻¹.

Diante do exposto, nota-se que a maioria dos estudos realizados têm foco sobre a capacidade de geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro sanitário, em uma abordagem mais geral. Desconsideram, no entanto, a viabilidade econômica da instalação e operação dos aterros e, ainda, a contribuição que eles podem oferecer, em termos de auxílio de custos para a administração pública. Além disso, os trabalhos realizados no Brasil não atentam para os municípios de pequeno e médio porte, que representam grande parte do território nacional e poderiam colaborar energeticamente para a sustentabilidade. Nesse sentido, o objetivo desse estudo é verificar a viabilidade econômica da instalação do sistema de geração de energia elétrica em aterros sanitários em cidades de 30 mil, 100 mil e 250 mil habitantes, a fim incentivar o uso do biogás como fonte de energia renovável.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a viabilidade econômica da utilização dos resíduos de aterro sanitário para a produção de energia elétrica em cidades de 30 mil, 100 mil e 250 mil habitantes.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar o potencial de geração de biogás do aterro sanitário de Cascavel e para municípios de 30 mil, 100 mil e 250 mil habitantes, considerando a quantidade de resíduo sólido urbano *per capita*;
- Determinar os custos de instalação do sistema de geração da energia elétrica a partir do biogás;
- Apresentar e avaliar a viabilidade econômica da geração de energia elétrica no sistema de compensação com concessionária local, considerando cenários distintos da utilização dos resíduos;
- Estimar e avaliar a viabilidade econômica da instalação do sistema de geração de energia elétrica em aterros sanitários e o aproveitamento da energia gerada para municípios de 30 mil, 100 mil e 250 mil habitantes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos sólidos

Definem-se como resíduos sólidos, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, os resíduos nos estados sólido ou semissólido que resultem de atividades de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição (ABNT, 2004). Ficam inclusos nessa definição os lodos provenientes de estações de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água ou, ainda, que exijam, para isso, soluções técnica e economicamente inviáveis, face à melhor tecnologia disponível.

Além dos resíduos sólidos apresentarem características físicas, químicas e biológicas variáveis, devido à diversidade de sua fonte ou atividade geradora, segundo Castilhos Junior (2006), outros fatores afetam o processo de geração, tanto em relação à sua composição qualitativa quanto à energia gerada - fatores culturais, econômicos, educacionais, geográficos, sociais, legais e tecnológicos. Os resíduos sólidos gerados pela atividade cotidiana dos cidadãos, pelos seus hábitos de consumo e pela produção industrial constituem um dos principais problemas presentes nos centros urbanos (CONRAD, 2000).

Diante da necessidade de estabelecer uma integração entre o tratamento e a disposição de resíduos sólidos no Brasil, foi instituída a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), pela Lei Nº 12.305/2010. A PNRS tem como objetivo principal estabelecer uma diretriz com medidas a serem adotadas em âmbito federal, em parceria com as demais instituições públicas (Estados e Municípios), visando ao gerenciamento dos resíduos sólidos e atribuindo responsabilidade aos geradores de resíduos, sendo ou não órgãos governamentais com as devidas aplicações econômicas (BRASIL, 2010a).

A definição de resíduo sólido é estabelecida no Inciso XVI do Artigo 3º da referida lei, como:

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

Considerando sua composição e características, os resíduos sólidos podem ser classificados de diferentes formas. A classificação é um fator essencial para a definição da estratégia mais viável de gerenciamento. De acordo com a PNRS, os resíduos são classificados quanto à sua origem e sua periculosidade. A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente:

Classe I ou perigosos: são aqueles que têm características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade e apresentam riscos à saúde pública como mortalidade, morbidade, ou adversidades ao meio ambiente, devido à disposição inadequada;

Classe II A ou não inertes: são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou de resíduos classe II B. Podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Classe II B ou inertes: aqueles que, quando amostrados representativamente, segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004) e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006 (ABNT, 2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspectos de cor, turbidez, dureza e sabor.

3.2 Resíduos sólidos urbanos

A PNRS é a primeira lei que estabelece uma política adequada para o tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU), estabelecendo diretrizes voltadas à coleta, tratamento e disposição de resíduos, minimizando sua geração.

Na alínea c, Inciso I do Artigo 13, a referida lei classifica os resíduos sólidos urbanos (RSU) como sendo resíduos domiciliares - oriundos de atividades domésticas em residências urbanas e resíduos de limpeza urbana - originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana.

O crescimento populacional e, conseqüentemente, o aumento do consumo de bens, além do processo de industrialização, têm contribuído para uma maior geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). O consumo de bens materiais tem aumentado significativamente nas últimas décadas e, como consequência, mais resíduos têm sido produzidos (PARO; COSTA; COELHO, 2008).

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, em 2019, o Brasil produziu cerca de 79 milhões de toneladas de RSU, um

crescimento de 19% em relação ao ano de 2010 (ABRELPE, 2020). Nesse mesmo período de comparação (2010-2019), a geração *per capita* de resíduos aumentou 9%, atingindo um total de 379,2 kg por habitante no ano de 2019. (Figura 1).

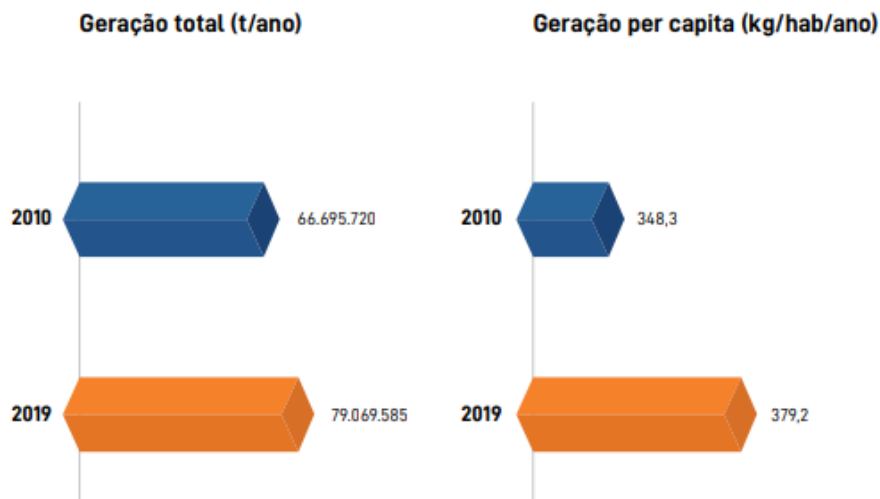


Figura 1 Comparação entre a geração de resíduos sólidos urbanos nos anos de 2010 e 2019.

Fonte: ABRELPE (2020).

Nota-se, portanto, na Figura 1, o aumento significativo da geração de resíduos no Brasil nesse período de 10 anos. Tomando por base o ano de 2020, com a emergência da pandemia da COVID-19, o cenário de gestão de resíduos, como vários outros setores da economia, também foi afetado, registrando um aumento ainda mais expressivo. Com o isolamento social, as medidas de distanciamento, restrições de atividades de comércio e alimentação e sistemas de trabalhos remoto, dentre outros fatores, os serviços de limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos sofreram grande impacto, uma vez que boa parte do descarte dos materiais consumidos foram transferidos, devido ao deslocamento e concentração das atividades nos domicílios.

Dados do último relatório da ABRELPE (2021) apontam que a geração de RSU no país sofreu influência direta da pandemia da COVID-19 durante o ano de 2020, tendo alcançado um total de, aproximadamente, 82,5 milhões de toneladas geradas, equivalentes a 225.965 toneladas diárias. Com isso, cada brasileiro gerou, em média, 1,07 kg de resíduo por dia. Em relação ao ano anterior, houve um aumento de mais de 3 milhões de toneladas de resíduos, o que corresponde a mais de 10 kg por habitante, no ano de 2020.

Esse aumento expressivo da geração de resíduos deve-se, possivelmente, às novas dinâmicas sociais adotadas para a contenção da propagação do vírus da COVID-19, que fizeram com que as pessoas permanecessem mais em suas residências substituindo, muitas

vezes, o consumo em restaurantes pelo sistema de *Delivery*, concentrando os demais descartes diários de resíduos em seus domicílios.

Estima-se que o país alcançará uma geração de 100 milhões de toneladas de RSU em 2033 (Figura 2), marca que traz um chamado urgente por políticas públicas mais incisivas de estímulo a não geração e à reutilização de materiais, etapas iniciais e prioritárias na hierarquia da gestão preconizada pela PNRS (ABRELPE, 2020).

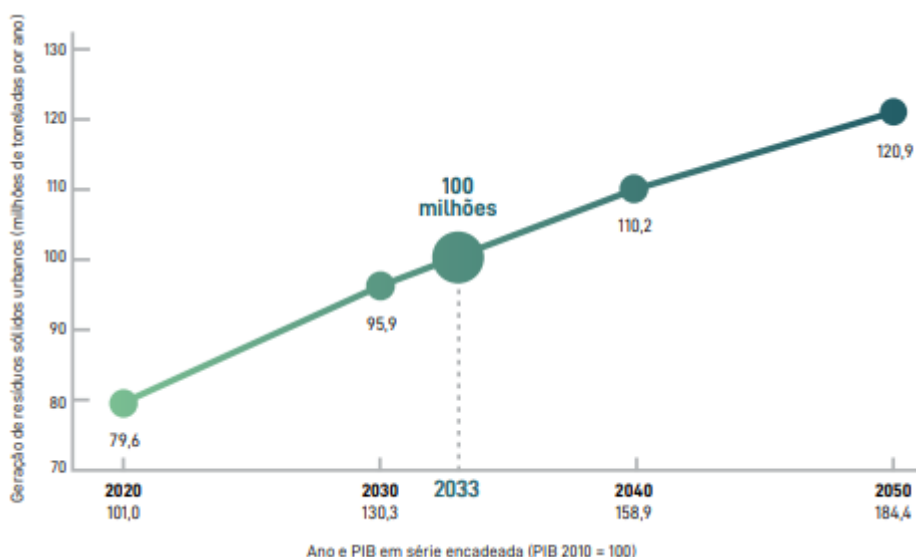


Figura 2 Geração de RSU com relação ao PIB (2019-2050).

Fonte: ABRELPE (2020).

Dessa forma, além da preocupação com a geração, a gestão dos resíduos se torna um fator preocupante no decorrer do tempo. Conforme Renou et al. (2008), a gestão dos RSUs constitui um problema ambiental, econômico e social, em que o volume de resíduos está crescendo em proporções maiores que o crescimento populacional.

Antes mesmo da PNRS ser instituída, conforme Lima (2001), um dos grandes desafios para políticas de gestão de resíduos era estabelecer um modelo conjunto de gestão de resíduos sólidos, de tal forma que minimizassem sua geração, incentivassem a reciclagem e as práticas de reuso, o tratamento adequado da disposição final dos RSUs e a maximização dos serviços de limpeza urbana.

Diante da implantação da PNRS, a responsabilidade pela efetivação das ações previstas na Lei 12305/2010, como as demais diretrizes e determinações previstas em seu regulamento, foram voltadas ao poder público, o setor empresarial e a coletividade. Dessa forma, a diminuição dos impactos ambientais causado pela geração dos resíduos foram atribuídos desde o fabricante do produto até o consumidor final, trata-se da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos.

A referida lei, define a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos no Inciso XVII do Artigo 3º como um:

conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos, nos termos desta Lei (BRASIL, 2010a).

Assim, de acordo com a lei, a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos tem por objetivos: (i) compatibilizar interesses entre os agentes econômicos e sociais e os processos de gestão empresarial e mercadológica com os de gestão ambiental, desenvolvendo estratégias sustentáveis; (ii) promover o aproveitamento de resíduos sólidos, direcionando-os para a sua cadeia produtiva ou para outras cadeias produtivas; (iii) reduzir a geração de resíduos sólidos, o desperdício de materiais, a poluição e os danos ambientais; (iv) incentivar a utilização de insumos de menor agressividade ao meio ambiente e de maior sustentabilidade; (v) estimular o desenvolvimento de mercado, a produção e o consumo de produtos derivados de materiais reciclados e recicláveis; (vi) propiciar que as atividades produtivas alcancem eficiência e sustentabilidade; (vii) incentivar as boas práticas de responsabilidade socioambiental.

Segundo Demirbas (2011), o gerenciamento dos resíduos sólidos inclui monitoramento, produção, coleta, transporte, processamento e descarte ou reciclagem. Por meio dessas etapas, os resíduos e os respectivos impactos ambientais podem ser gerenciados de maneira eficaz e responsável. A gestão dos RSUs possui como objetivos principais a coleta, o tratamento e a disposição final do lixo gerado pela população. Tal gerenciamento, além de respeitar as normas socioambientais, também, deve ser economicamente viável.

Assim, cabe à união, estado e município elaborarem o plano de gestão integrada de gerenciamento dos resíduos sólidos a fim de assegurar a observância da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o cumprimento de suas respectivas diretrizes.

Com a regulamentação da PNRS no Brasil, houve uma melhora no processo de gerenciamento, tratamento e disposição dos resíduos, no entanto, ainda há muito o que se empenhar para que haja uma gestão integrada de resíduos sólidos, a fim de minimizar os impactos ambientais causados pela disposição inadequada dos RSUs. A caracterização dos resíduos é uma etapa importante para que a gestão ocorra de maneira eficaz.

A caracterização dos RSUs é um dos passos pelo qual se inicia a gestão e o gerenciamento, pois suas características sofrem a influência de vários fatores, tais como

número de habitantes do município, poder aquisitivo, hábitos e costumes da população, nível educacional e condições climáticas, entre outros (CONSON; PERES; CASTRA, 2010).

Encinas, Nobrega e Couto Júnior (2004) classificam os resíduos sólidos, enquanto origem como: lixo doméstico ou domiciliar, lixo industrial, lixo de serviços públicos, lixo comercial, lixo público, lixo agrícola e entulho.

Segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004), a caracterização dos RSUs consiste na determinação dos constituintes e suas respectivas porcentagens em peso, em uma amostra de resíduos sólidos, podendo ser físico, químico e biológico.

Com o aumento da geração dos RSUs e, conseqüentemente, o aumento de materiais classificados como perigosos, torna-se necessária a adoção de mecanismos de identificação mais eficazes no gerenciamento dos resíduos. Nesse contexto, a caracterização de resíduos é uma ferramenta importante para definição do seu ciclo final, já que sua manipulação de maneira correta tem grande importância no controle do risco que ele representa (COMLURB, 2008).

Além disso, Barros et al. (2007) mencionam que a importância dessa definição está relacionada à escolha da melhor tecnologia para o manuseio, tratamento e/ou aproveitamento e destinação final dos resíduos sólidos. As técnicas de tratamento são destinadas a reduzir o potencial poluidor, buscando minimizar os impactos ao meio ambiente (CARDOSO, 2004).

Como os RSUs possuem características físicas e químicas distintas, existem vários procedimentos para o seu tratamento. Os principais tipos de tratamentos aplicados são a reciclagem, compostagem e incineração.

3.3 Tratamento dos resíduos sólidos

3.3.1 Reciclagem

A reciclagem consiste em um processo no qual um produto ou material descartado é recuperado, reintroduzido no processo produtivo e transformado em um novo produto, permitindo o reaproveitamento ou uma nova utilização (LIMA, 2004).

Além de diminuir a necessidade de extração dos recursos naturais utilizados em processos de fabricação, a reciclagem se caracteriza como um processo interessante do ponto de vista econômico, social e ambiental, pois reduz a quantidade de resíduos destinados a aterros. O tratamento dos RSUs por meio da reciclagem recebeu importância devido ao fato de a reciclagem promover a preservação dos recursos minerais e energéticos, bem como

proporcionar aumento da vida útil dos aterros, fatores fundamentais para o desenvolvimento sustentável (TENÓRIO; ESPINOSA, 2004).

A distinção entre o conceito de resíduo reciclável e reaproveitável, revela a importância ambiental da reciclagem. Quando se fala em reciclar um resíduo, a ideia é transformá-lo em algo novo, ou seja, inserir o material em um novo ciclo de produção. Já a reutilização de um material dispensa o reprocessamento, reaproveitando o resíduo em diversas outras possibilidades de uso. Segundo Donha (2002), tal distinção permite o entendimento de uma consciência ecológica em relação aos elementos recicláveis e reaproveitáveis com valor para a preservação do meio ambiente e dos recursos não renováveis e, ainda, a instauração de uma cultura antidesperdício.

3.3.2 Compostagem

A compostagem é um método de reciclagem de resíduos baseado na degradação biológica da matéria orgânica em condições aeróbias (WEI et al., 2017). É um processo natural de decomposição dos resíduos que ocorre por meio de processos físicos, químicos e biológicos, transformando a matéria orgânica em um material estável. Essa transformação ocorre naturalmente e é realizada por microrganismos presentes nos próprios resíduos, porém, pode ser acelerada pela intervenção humana (BRITO, 2010).

Segundo Reis (2005), os RSUs apresentam grande potencial para a compostagem, visto que possuem grande fração de matéria orgânica, no entanto, o método de reciclagem de resíduos é baseado na degradação biológica da matéria orgânica em condições aeróbias. A triagem caracteriza a primeira etapa do processo de compostagem de RSU e é a partir disso, que se obtém a máxima recuperação de matéria orgânica. Após a triagem, os resíduos passam por uma nova fase que é a decomposição da fração biodegradável que origina, após a maturação, o composto orgânico.

O composto orgânico é tido como um condicionador do solo, pois, além de melhorar suas propriedades físicas, químicas e biológicas não ocasiona riscos ao meio ambiente. A adição de composto ao solo fornece nutrientes para o crescimento das plantas, melhora a estrutura do solo, aumenta a capacidade de retenção de água e reduz a dependência de fertilizantes químicos (JORDÃO et al., 2006; CHEN et al., 2015; HERNÁNDEZ, GARCIA, GARCÍA, 2015).

De acordo com Jardim (2000), a produção de um composto de boa qualidade depende das condições físicas e químicas adequadas, que podem ocorrer de duas maneiras:

(i) Método natural: a fração orgânica do lixo é disposta em leiras em um pátio, onde a aeração é feita por revolvimentos periódicos do material para que ocorra sua decomposição. A duração desse processo pode variar de três a quatro meses;

(ii) Método acelerado: a aeração é feita de forma forçada. Pode ser realizada utilizando-se tubulações perfuradas, sobre as quais são colocadas as leiras de material orgânico. Ou então, por meio de reatores, dentro dos quais os resíduos orgânicos avançam no sentido contrário ao da corrente de ar. Ali, os resíduos permanecem cerca de quatro dias e, em seguida, são dispostos em pilhas. A duração desse processo pode variar de dois a três meses.

3.3.3 Incineração

Também chamado de tratamento térmico de resíduos, a incineração é o processo de queima de resíduos a elevadas temperaturas (900 a 1200° C) com tempo de permanência controlado, onde ocorre a decomposição térmica da parcela orgânica dos resíduos, resultando em um produto com menor peso e volume (ESSENCIS, 2010).

Dentre as vantagens do processo de tratamento térmico de resíduos, destacam-se a redução do peso e volume e o aproveitamento da energia gerada durante a combustão, que pode ser utilizada para a produção de eletricidade ou calor. O calor proveniente dos gases de exaustão pode ser aproveitado para geração de energia térmica, produzindo vapor por meio de uma caldeira de recuperação ou para geração de energia elétrica, em que o vapor produzido é expandido em uma turbina a vapor (CORTEZ, 2011).

A incineração é um processo complementar ao aterramento e aos programas de reciclagem, conhecidos como 3 R's (Reduzir na fonte, reutilizar e reciclar), na medida em que esses sejam economicamente viáveis localmente (CALDERONI, 1999).

No Brasil, diversas tentativas de utilização dessa tecnologia não tiveram sucesso, devido a problemas de dimensionamento, operação ou manutenção. Desde 1986 foram instalados no país diversos incineradores de RSU de pequeno porte e, os que ainda operam, o fazem de forma precária e inadequada, com equipamentos obsoletos, resultando em uma imagem negativa vinculada a esse processo. Em contrapartida, em diversos países da Europa, as plantas de incineração passaram por processos de modernização e de controle do processo de combustão, resultando em um método eficaz e viável do tratamento dos resíduos (GONÇALVES, 2007).

3.4 Destinação final dos resíduos sólidos

De acordo com o PNRS, inciso VII do art. 3º, a destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos compreende a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes, dentre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar impactos ambientais adversos.

A opção de disposição final ambientalmente adequada, conforme o PNRS, cabe apenas para os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação, não apresentem outra possibilidade que não a disposição em aterro sanitário - os rejeitos.

A destinação final dos resíduos sólidos é realizada de várias formas, no entanto nem todas são ambientalmente adequadas. A maior parte das formas de despejo desses resíduos são incorretas, irregulares e sem controle, o que pode resultar em contaminação como consequência dessas atividades (CASTILHOS JR., 2003). As formas mais comuns quanto à disposição dos resíduos são o lixão, o aterro controlado e o aterro sanitário.

De acordo com ABRELPE (2021), são produzidas cerca de 225.965 toneladas de lixo por dia no Brasil, dos quais 49,7% são oriundos da região Sudeste, 24,7% da região Nordeste, 10,8% da região Sul, 7,4% da região Norte e 7,5% da região Centro-Oeste. Do total de resíduos gerados anualmente, pouco mais de 60% é encaminhado para aterros sanitários, ou seja, os lixões e aterros controlados receberam mais de 82 mil toneladas de resíduos por dia, o que corresponde a 39,8% dos resíduos (Figura 3).

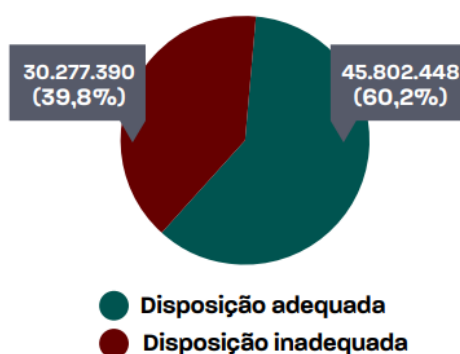


Figura 3 Destinação final dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2020.

Fonte: ABRELPE (2021).

Em termos regionais, as regiões Centro-Oeste, Nordeste e Norte ainda registram índices muito abaixo do esperado, com relação à destinação adequada dos RSUs (Tabela 1).

Tabela 1 Disposição final de RSU nas regiões, por tipo de destinação (T/ano)

Região	Disposição adequada		Disposição inadequada	
	t/ano	%	t/ano	%
Norte	1.773.927	35,6	3.209.013	64,4
Nordeste	6.016.948	36,3	10.558.666	63,7
Centro-Oeste	2.456.849	42,5	3.323.972	57,5
Sudeste	29.542.830	73,4	10.706.257	26,6
Sul	6.011.894	70,8	2.479.482	29,2
Brasil	45.802.448	60,2	30.277.390	39,8

Fonte: ABRELPE (2021).

De acordo com a Tabela 1, 60,2% dos resíduos sólidos produzidos no Brasil são destinados aos aterros sanitários; nas regiões Sul e Sudeste esse índice atinge mais de 70%. No entanto, as regiões Centro-Oeste, Nordeste e Norte, ainda destinam seus resíduos de forma inadequada. Segundo a ABRELPE (2021), na região Norte, 78,6% das cidades (354 municípios) ainda encaminham seus resíduos para aterros controlados ou lixões. A região Nordeste, por sua vez, concentra o maior número de cidades com destinação irregular: 1.283 municípios (71,5%); no Centro-Oeste, 63,2% dos municípios (295 cidades) encaminham seus resíduos para unidades inadequadas.

Segundo Menezes (1995), as áreas destinadas aos lixões e aterros controlados no Brasil, além de terem sido implantadas em locais inapropriados, são desprovidas de qualquer cuidado ambiental. Geralmente, após o despejo não são realizados tratamentos ou o emprego de algum material de cobertura na área, deixando à deriva o risco de emissão de poluentes.

O processo de viabilizar a destinação final ambientalmente adequada de resíduos, no entanto, depende de inúmeros fatores, que vão desde a implementação de políticas públicas que visem à gestão integrada, de forma a conferir ganhos de escala e redução de custos, até ações direcionadas ao consumo e descarte conscientes, redução, reutilização e reciclagem de produtos.

De acordo com a PNRS, todas as alternativas de destinação final ambientalmente adequadas dos RSUs visam à economia de recursos naturais, de energia, de recursos financeiros e à sustentação econômica dos serviços. Assim, é extremamente importante a integração entre um programa adequado de coleta de resíduos e a implantação de aterros sanitários, além da necessidade de conscientização da sociedade quanto à correta separação e destinação dos resíduos gerados, a fim de prevenir a contaminação e, consequentemente, diminuir o risco de poluentes no meio ambiente.

3.4.1 Lixão

Segundo Bidone (2001), lixão é a descarga de resíduos a céu aberto sem levar em consideração: (i) a área em que está sendo feita a descarga; (ii) o escoamento de líquidos formados que, percolados, podem contaminar as águas superficiais e subterrâneas; (iii) a liberação de gases, principalmente o gás metano que é combustível, embora seja produzido em menor quantidade devido à ausência de compactação, visto que há presença de ar; (iv) o espalhamento de lixo, como papéis e plásticos pela redondeza, por ação do vento; (v) a possibilidade de criação de animais como porcos, galinhas etc., nas proximidades ou no local, bem como a ação humana vasculhando o lixo como forma de sustento.

De acordo com Guerra (2018), como nos lixões, o resíduo é lançado diretamente no solo a céu aberto sem nenhum cuidado ambiental ou qualquer controle, torna-se prejudicial à saúde e ao meio ambiente. Dessa forma, como não apresentam nenhuma preparação do solo, é o sistema de disposição dos resíduos sólidos, que leva a maiores danos ambientais e necessita de maiores cuidados, visto que o chorume, produzido pela putrefação de materiais orgânicos, infiltra-se no solo, levando à contaminação que, com o passar do tempo, pode atingir o lençol freático. Além disso, lixões contribuem para a proliferação de insetos e vetores de muitas doenças de grandeza sanitária. Ainda, visto que os resíduos são simplesmente amontoados nos locais, produzem um aspecto visual negativo para a sociedade.

3.4.2 Aterro controlado

Segundo a NBR 8849/1985, aterro controlado define-se como uma técnica de disposição de RSU no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais (ABNT, 1985), método que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho.

Assim, o aterro controlado caracteriza-se por apresentar certo controle na disposição dos resíduos e recebe algum tipo de cobertura. Pode-se dizer que é uma categoria intermediária entre o lixão e o aterro sanitário.

Entretanto, nessa forma de disposição dos resíduos, não há nenhum tipo de controle nas dispersões de gases, além de não haver tratamento do chorume gerado e uma adequada impermeabilização do solo. Assim, o aterro controlado também é considerado uma forma inadequada de disposição de resíduos, visto que não há controle na impermeabilização do solo. A disposição final de resíduos em aterros controlados minimiza o impacto ambiental, pois ocorre uma compactação e a cobertura do resíduo, porém, essa técnica de disposição

final peca pela falta de impermeabilização do solo, ausência de tratamento de chorume e gases e pela falta de sistemas de drenagem, dentre outros (JUSTI; MOLITERNO, 2008).

3.4.3 Aterros sanitários

Conforme a NBR 8419/1992, aterro sanitário consiste em:

técnica de disposição de resíduos sólidos no solo após sua impermeabilização, sem causar danos à saúde pública e à segurança e minimizando os impactos ambientais. Método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se for necessário (ABNT, 1992).

Como o aterro sanitário é caracterizado pela impermeabilização do solo, compactação e cobertura das células de lixo, sistemas de coleta, tratamento de gases e chorume, essa é considerada a forma mais correta disposição final de resíduos sólidos. O tratamento do chorume em aterro sanitário é feito por meio de um sistema de drenagem pelo qual, após o tratamento, ele é devolvido ao ambiente, com riscos mínimos de contaminação (MANAHAN, 1999).

Para Youcai e Ziyang (2017), um aterro sanitário adequado é um local planejado e controlado com sistemas de drenagem e tratamento de lixiviados, evitando a contaminação das águas subterrâneas e outros sistemas, para coletar e queimar o biogás gerado.

No Brasil, atualmente, os aterros sanitários são a forma de tratamento mais utilizada, pois apresenta o menor custo associado. De acordo com Araya (2018), o aterro é geralmente a opção mais barata para a disposição de resíduos e o processo com uma maior referência econômica está associado à reciclagem.

Os resíduos destinados aos aterros sanitários devem ser combinados com uma intensa campanha de coleta seletiva e reciclagem, de forma a aumentar consideravelmente a vida útil do aterro, além de criar uma cultura de conscientização e, por conseguinte, uma maior participação da sociedade no tratamento e coleta do lixo, gerando respostas positivas quanto à preservação do meio ambiente. Segundo Schalch et al. (2002), a implantação do aterro sanitário não elimina a necessidade da coleta seletiva e necessidade de reciclagem do lixo.

3.4.4 Implantação do aterro sanitário

Para construção de um aterro sanitário devem ser seguidas às especificações técnicas da NBR 8419/1992. Assim, é fundamental estudos geológicos e topográficos para selecionar a área destinada a instalação com intuito de minimizar os impactos ambientais.

Conforme Gavino (2018), a implantação de um aterro sanitário deve respeitar critérios específicos, quais sejam: (i) estar localizado fora da área de influência direta do manancial de abastecimento público; (ii) manter a área de disposição final a uma distância mínima de 200 m de rios, nascentes e demais corpos hídricos; em situações nas quais forem previstas distâncias maiores, de acordo com o Código Florestal ou demais legislações aplicáveis no que diz respeito às áreas de preservação permanente - APP, elas deverão ser atendidas; (iii) estar localizado a uma distância mínima de 1500 m de núcleos populacionais, a partir do perímetro da área; (iv) estar localizado a uma distância mínima de 300 m de residências isoladas, a partir do perímetro da área; (v) possuir sistema de impermeabilização, lateral e de fundo, com geomembrana ou sistemas de impermeabilização similares, não sendo autorizada disposição direta no solo; (vi) realizar cobertura diária dos resíduos, com camadas de solo ou outro material apropriado, reutilizável ou não; (vii) ser projetado para uma vida útil superior a 15 anos; (viii) possuir sistema de monitoramento de águas subterrâneas a montante e a jusante da área do empreendimento, conforme normas técnicas vigentes.

Schalch et al. (2002) ressaltam que, em obras de aterro sanitário, deve-se ter cuidados quanto ao sistema de drenagem superficial para desvio de águas da bacia de contribuição para fora de áreas do aterro sanitário, cuja principal finalidade é diminuir o volume de líquido percolado.

Além disso, antes de serem implementados, os aterros devem obter as devidas licenças concedidas por órgãos ambientais municipais, estaduais e/ou federais. Segundo Elk (2007), o licenciamento para aterros sanitários, em nível nacional, é concedido pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, por meio das seguintes resoluções: (i) CONAMA 01/1986: refere-se à definição de responsabilidades e critérios para realizar o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e a emissão do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA); (ii) CONAMA 237/1997: trata-se da regulamentação sobre aspectos previstos na Política Nacional do Meio Ambiente; (iii) CONAMA 308/2002: estabelece critérios e procedimentos para o licenciamento ambiental, em municípios de pequeno porte, de unidades de disposição final de resíduos sólidos e para obras de recuperação de áreas degradadas pela disposição inadequada dos resíduos sólidos. No Paraná, o órgão responsável pela liberação de licenças e fiscalização de aterros sanitários é o Instituto Ambiental do Paraná - IAP.

Conforme as resoluções do CONAMA, segundo Gavino (2018), para a implantação de um aterro sanitário, devem ser obtidas: Licença Prévia (LP), necessária a apresentação do

projeto básico prevendo dados de localização e viabilidade; Licença de Instalação (LI), concedida pelo órgão ambiental responsável após a avaliação do projeto executivo, e determina se a execução do projeto do aterro poderá ser iniciada; Licença de Operação (LO), obtida após a conclusão da obra, desde que sua estrutura esteja compatível com o projeto.

Conforme o autor, para concessão da LP, o projeto preliminar é essencial e irá avaliar a continuidade do procedimento. Deve conter o croqui situando a área em que se planeja instalar o aterro sanitário, bem como seus arredores destacando as comunidades e corpos hídricos mais próximos. Ainda, deve ser apresentado o memorial descritivo juntamente com o projeto, que tem o intuito de informar as medidas mitigadoras dos impactos ambientais decorrentes da implantação e operação do aterro.

O documento analisado para a LI é o projeto técnico, que deve apresentar em seu memorial descritivo informações a respeito dos acessos e do isolamento da área do aterro e, no memorial técnico, o resultado dos cálculos dos dimensionamentos dos sistemas de drenagem de águas pluviais, drenagem de gases, drenagem de lixiviados e, também, do sistema de tratamento dos lixiviados. Cabe ressaltar, que o projeto deve contemplar o monitoramento do aterro durante a operação e até 20 anos após seu fechamento, bem como o uso da área após o encerramento das atividades.

Somente após a aprovação do projeto técnico pelo órgão ambiental as obras para a implantação do aterro poderão ser iniciadas. Quando finalizada a construção, o engenheiro responsável emite o laudo de conclusão da obra e a Anotação de Responsabilidade Técnica - ART que, permitirá a concessão da LO.

Os principais componentes que constituem um aterro sanitário são: camada de impermeabilização inferior, sistema de coleta de chorume, sistema de captação dos gases, camada de impermeabilização superior, tratamento de chorume, monitoramento de águas superficiais e lençóis freáticos e drenagem de águas pluviais. A Figura 4 apresenta o esquema de um aterro sanitário.

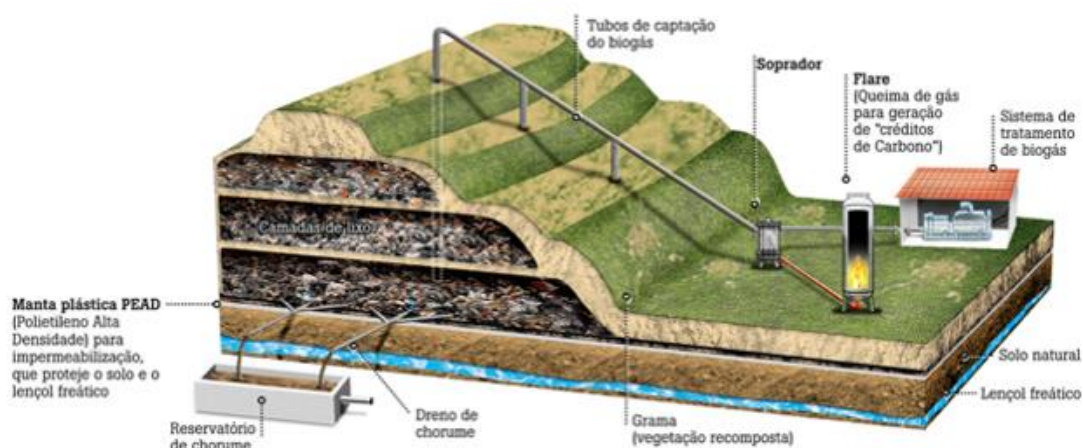


Figura 4 Esquema de um aterro sanitário.

Por meio da coleta, os RSUs chegam aos aterros sanitários, onde a quantidade de resíduo depositado é controlada por meio de pesagem em balança na entrada. Posteriormente, os resíduos são espalhados em proporção que varia de 1 unidade na vertical para 3 unidades na horizontal (1:3). Nessa rampa, um trator da esteira compacta o lixo com uma frequência de 3 a 5 vezes e ao final desse processo o resíduo é recoberto por uma cobertura de solo (15 a 20 cm de espessura). À medida que se tem a capacidade do aterro esgotada, a cobertura final do solo será mais espessa, cerca de 60 cm. Geralmente, após o recobrimento há a plantação de grama a fim de evitar processos erosivos (CARMO JUNIOR, 2012).

As camadas de lixo formam as células nas quais são construídos drenos internos nas posições horizontais e verticais, distribuídos espacialmente de forma adequada e interligados com o intuito de drenar de modo eficiente os gases e o chorume gerado na decomposição dos resíduos. Os gases captados por esses drenos podem ser queimados através do flare ou utilizados como fonte de energia. O chorume é conduzido e depositado em lagoas para tratamento, permitindo, assim, a degradação da matéria orgânica. Após a estabilização do efluente, ele pode ser descartado ou utilizado na fertirrigação de gramados da cobertura do solo em áreas encerradas do aterro.

Conforme Cunha e Consoni (1995), é necessário considerar o tempo de vida útil de um aterro sanitário, mesmo após o seu fechamento, devido a importância do monitoramento contínuo e a manutenção das diversas etapas de um aterro sanitário (fases de projeto, instalação, operação, encerramento e pós-fechamento).

A classificação dos aterros sanitários se dá quanto ao método de construção utilizado (LIMA, 2001): trincheira, rampa ou em área.

Segundo Lima (2001), o método de trincheira se refere à escavação de dois a três metros de profundidade, podendo se estender até cinco metros, variando de acordo com a profundidade do lençol freático, sendo recoberto pelo próprio material escavado. Sendo assim, à medida que os resíduos são compactados há uma tendência de que a vida útil do aterro aumente.

Ainda de acordo com Lima (2001), o método de rampa é feito em terrenos com certo declive, onde os resíduos são depositados e compactados, tendo sucessivos recobrimentos por solo argiloso com espessura de 20 cm até atingir o topo do declive. Na parte superior e lateral todo o declive fica recoberto pelo material (geralmente argiloso). A construção do aterro por esse método forma áreas planas, configurando um aterro tipo pirâmide.

O aterro do tipo área ou superfície é implantado em locais cuja topografia seja plana, e, portanto, inadequadas para a criação de células. A disposição de resíduos é feita por meio

de dique de terra ou mesmo dos próprios resíduos. Esse tipo de aterro tem como desvantagem ser de alto custo (CARMO JUNIOR, 2012).

A Figura 5 mostra a classificação do aterro sanitário quanto à forma de construção, segundo Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993).

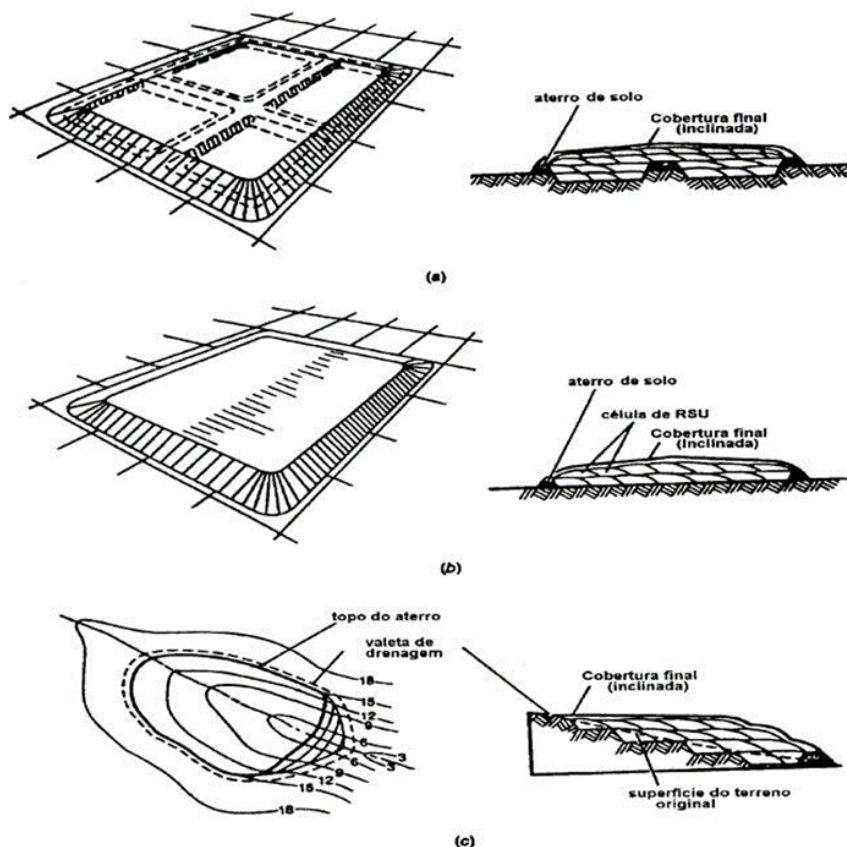


Figura 5 Tipos de aterro sanitário, quanto à forma de construção. a) Trincheira; b) Superfície/Planar; c) Rampa.

Fonte: Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993).

3.5 Geração do biogás

O biogás é gerado pela decomposição da matéria orgânica dos resíduos dispostos nos aterros sanitários e é composto pelos gases amoníaco (NH_3), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2), gás sulfídrico ou sulfeto de hidrogênio (H_2S), metano (CH_4), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2), sendo o metano e o dióxido de carbono os gases encontrados em maior quantidade. Nas camadas inferiores de aterros e lixões, a concentração de oxigênio é baixa e os componentes orgânicos biodegradáveis são

decompostos principalmente pelo processo biológico anaeróbio, gerando um gás contendo cerca de 50 a 60% de metano, que é a principal fonte conversora de energia (USEPA, 2016).

Na Tabela 2 apresentam-se as distribuições percentuais típicas dos gases encontrados em um aterro sanitário.

Tabela 2 Constituintes típicos encontrados no biogás dos aterros de RSUs

Componente	Porcentagem (%) [*]
Metano	45 – 60
Dióxido de carbono	40 – 60
Nitrogênio	2 – 5
Oxigênio	0,1 - 1,0
Enxofre, mercaptanas	0 - 1,0
Amônia	0,1 - 1,0
Hidrogênio	0 - 0,2
Monóxido de carbono	0 - 0,2
Gases em menor concentração	0,01 - 0,6

Fonte: Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1994).

^{*}A distribuição percentual exata variará segundo o tempo de uso do aterro.

Ivan et al. (2015) mencionam que o biogás é gerado por uma série de estágios que ocorrem na ausência de oxigênio. Conforme descrito por Jacobowski (2018), o processo de geração dos gases ocorre durante o tempo ativo do aterro, isto é, até a maturação da massa dos resíduos, em cinco etapas:

- (i) Formação inicial - O processo de biodegradação dos resíduos ocorre inicialmente em condições aeróbias formando água e gás carbônico. A terra, utilizada na cobertura, auxilia na produção dos microrganismos que, devido às variações das condições ambientais, começam a mudar, dando início a fase de decomposição anaeróbia.
- (ii) Transição - A taxa de oxigênio na massa dos resíduos aterrados começa a reduzir e iniciam as reações anaeróbias. Nitratos e sulfatos se tornam receptores de elétrons nas reações biológicas de conversão e se transformam em gás nitrogênio e sulfídrico. Ocorre a produção de metano e com a redução do potencial de oxirredução os microrganismos iniciam o processo de conversão do material orgânico em ácidos orgânicos e outros componentes. Esse processo vem causar ao aterro um ambiente mais neutro em que as bactérias produtoras de metano começam a se estabelecer.
- (iii) Ácida - As reações ganham força, gerando ácidos orgânicos e quantidades menores de gás hidrogênio. O primeiro passo no processo de degradação anaeróbia envolve a transformação mediada por enzimas (hidrólise) de compostos que possuem maior massa molecular em compostos apropriados

para o uso como fonte de energia para os organismos. O segundo passo compreende a acetogênese e a acidogênese, com a conversão dos compostos resultantes da hidrólise em compostos intermediários, tais como o ácido acético. O principal gás gerado durante essa fase ácida é o dióxido de carbono.

- (iv) **Metanogênica** – Nessa etapa, os microrganismos anaeróbicos convertem o ácido acético e gás hidrogênio em metano e dióxido de carbono. A geração de metano e ácidos ocorre simultaneamente.
- (v) **Maturação** – A fase de maturação ocorre depois do material orgânico biodegradável ter sido convertido em metano e dióxido de carbono. O volume de geração de gás diminui, devido à baixa de nutrientes já consumidos e permanece de forma lenta. Os substratos que permanecem no aterro são lentamente biodegradados. Após o fechamento do aterro, ainda é possível encontrar pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio no gás.

Teoricamente, a duração e as divisões de cada fase da produção do biogás no aterro sanitário são bem definidas, no entanto, na prática, devido à composição dos resíduos ser bastante diversificada, elas ocorrem simultaneamente em diversas partes do aterro. Assim, a duração de cada fase varia de acordo com alguns fatores como: a distribuição de componentes orgânicos, a disponibilidade de nutrientes, o teor de umidade e o grau de compactação inicial dos resíduos.

Na Tabela 3, apresenta-se o intervalo de duração das fases de degradação anaeróbia em aterros sanitários, conforme Maciel (2003).

Tabela 3 Duração das fases de degradação anaeróbia

Fases	Intervalo de duração das fases
i – Formação inicial	Algumas horas a 1 semana
ii – Transição	1 mês a 6 meses
iii – Ácida	3 meses a 3 anos
iv – Metanogênica	8 anos a 40 anos
v – Maturação	1 ano a mais de 40 anos

Conforme Brito Filho (2005), a decomposição dos resíduos e a produção do biogás, podem ocorrer por períodos que vão de 30 a 100 anos. Esse intervalo é relativamente expressivo, visto que, como há fatores que interferem na decomposição e produção do biogás, na prática, ele pode ocorrer em períodos mais curtos ou mais longos.

Bruto Filho (2005) ainda cita os principais fatores que interferem na produção do biogás gerado em aterros sanitários, são eles: (i) a composição dos resíduos, quanto maior o percentual de matéria orgânica de fácil degradação e menor o percentual de inertes, maior será a tendência de geração de biogás; (ii) a umidade, quanto menor a umidade da massa de

resíduos menor será a produção; (iii) a granulometria, partículas pequenas são propícias para a formação do gás de aterro, devido à maior superfície específica, facilitando os mecanismos de degradação; (iv) o pH é um parâmetro importante, pois os organismos anaeróbios se desenvolvem na faixa da neutralidade, isto é, entre 6 e 8; (v) a temperatura é outro fator interveniente, porque deve oscilar numa faixa entre 30 e 60 °C, para não limitar a atividade anaeróbia. Outros fatores, ainda, podem influenciar a produção do biogás, como as dimensões do aterro (área e profundidade), operação do aterro, a idade dos resíduos, os nutrientes, bactérias, potencial oxidação-redução, densidade da produção gás e compactação dos resíduos.

A principal maneira de captação do biogás ocorre por meio de tubos verticais perfurados, colocados quando os resíduos ainda estão sendo depositados no aterro. Podem ser tubos de sucção horizontal, quando o lixo ainda está sendo depositado no aterro e assim ele poderá ser extraído desde o início de sua produção (WILLUMSEN, 2001).

A coleta do biogás de aterro é realizada por um sistema padrão composto por poços de coleta e tubos condutores, sistema de compressão e sistema de purificação do biogás. Além disto, segundo Figueiredo (2011), a maioria dos aterros sanitários com sistema de recuperação energética possui flare para queima do excesso do biogás ou para uso durante os períodos de manutenção dos equipamentos de geração de energia elétrica.

O aproveitamento energético do biogás produzido pela degradação dos resíduos tem como principal objetivo convertê-lo em uma forma de energia útil, tais como eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular ou para abastecer gasodutos com gás de qualidade.

Dessa forma, parte do metano gerado nos aterros sanitários pode ser coletado e utilizado como fonte de energia renovável (LINO; ISMAIL, 2011; NADELETI et al., 2017; OUDA et al., 2016).

3.6 Tecnologias para conversão do biogás em energia

Segundo Figueiredo (2011), a produção de energia elétrica por meio do biogás apresenta algumas vantagens como a utilização de um combustível renovável de baixo custo (resíduo de processo), com menor emissão de poluentes, além da possibilidade de geração descentralizada próxima aos pontos de distribuição, diminuindo custos e perdas na transmissão.

Destacam-se, dentre as tecnologias convencionais para a transformação do biogás em energia, as caldeiras, turbinas a gás e os motores de combustão interna.

As caldeiras para vapor d'água são equipamentos capazes de produzir vapor, saturado ou superaquecido, a partir da queima de um combustível. Na Figura 6 visualiza-se apresenta o funcionamento básico do ciclo a base de biogás.

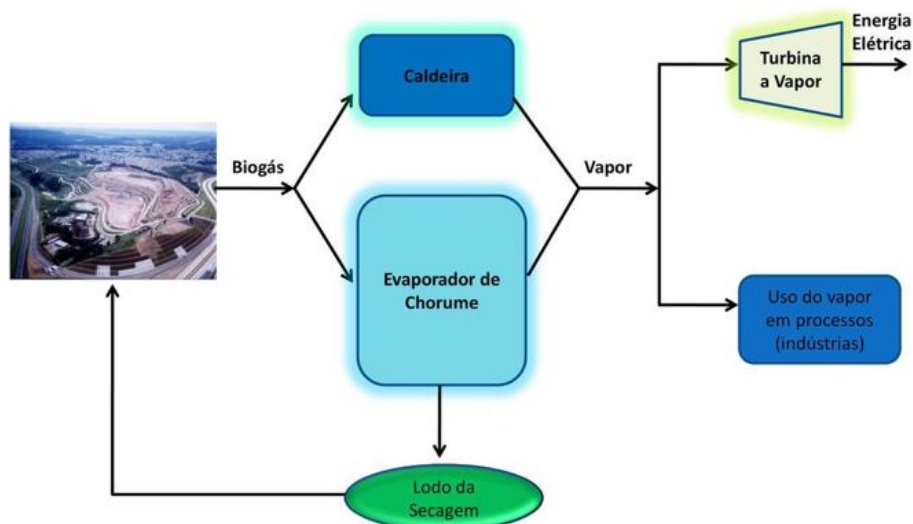


Figura 6 Funcionamento do ciclo a vapor à base de biogás.

A energia térmica da combustão do biogás é transferida à caldeira, onde ocorre o aquecimento da água e posterior vaporização. O vapor gerado pode seguir diretamente para os processos industriais ou para uma turbina a vapor. Esse vapor se expande conforme passa pela turbina, exercendo trabalho sobre as palhetas e gerando potência mecânica no eixo da turbina, que por sua vez aciona um alternador produzindo energia elétrica.

Salomon (2007) faz algumas considerações a respeito da combustão direta do biogás em caldeiras, como o controle do nível de umidade e vazão do combustível. Cita que a umidade pode danificar o equipamento, causar problemas durante sua operação e, portanto, deve ser controlada por meio de linhas de condensado e purgadores. Enquanto isso, a variação da qualidade do gás torna necessária a instalação de válvulas e sensores que controlem a quantidade de combustível que será queimado, de acordo com a concentração de metano presente no mesmo. É importante ressaltar que a produção da eletricidade depende do fluxo de vapor, bem como das características de entrada e saída da turbina.

As turbinas a gás são classificadas em ciclo fechado e ciclo aberto, de acordo com o ciclo de operação, sendo o ciclo aberto o mais comum (Figura 7).

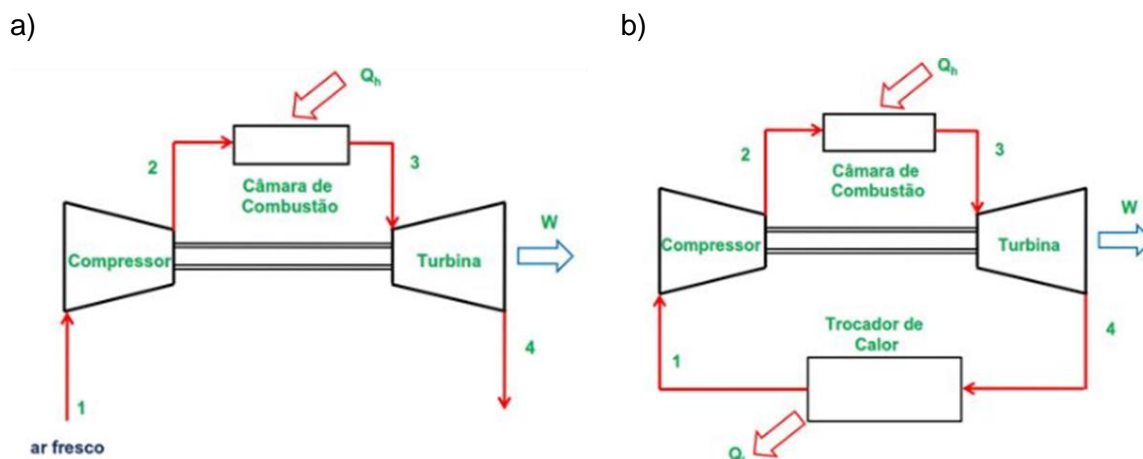


Figura 7 a) Ciclo aberto da turbina a gás; b) Ciclo fechado da turbina a gás.

Pode-se dizer que o ciclo aberto é o processo real de combustão interna, enquanto que o ciclo fechado é a aproximação de um processo ideal de transferência de calor. Segundo Moran e Shapiro (2002), o estudo de instalações de potência com turbinas a gás é uma análise de ar padrão, em que sempre são estabelecidas duas hipóteses: o ar é o fluido de trabalho (se comporta como gás ideal) e o aumento de temperatura que seria obtido por meio da combustão é realizado por meio de uma fonte externa de calor.

O motor de combustão interna é assim denominado por produzir energia mecânica queimando uma mistura de vapor e combustível dentro de um cilindro. A transformação do movimento retilíneo do pistão em circular por meio de um virabrequim, gera a energia mecânica. É um mecanismo amplamente utilizado, por ser um processo prático e apresenta grande durabilidade (CORREA, 2003).

Na Figura 8 visualizam-se os quatro tempos do motor Otto, assim designado, pois seu funcionamento ocorre sequencialmente em quatro etapas.

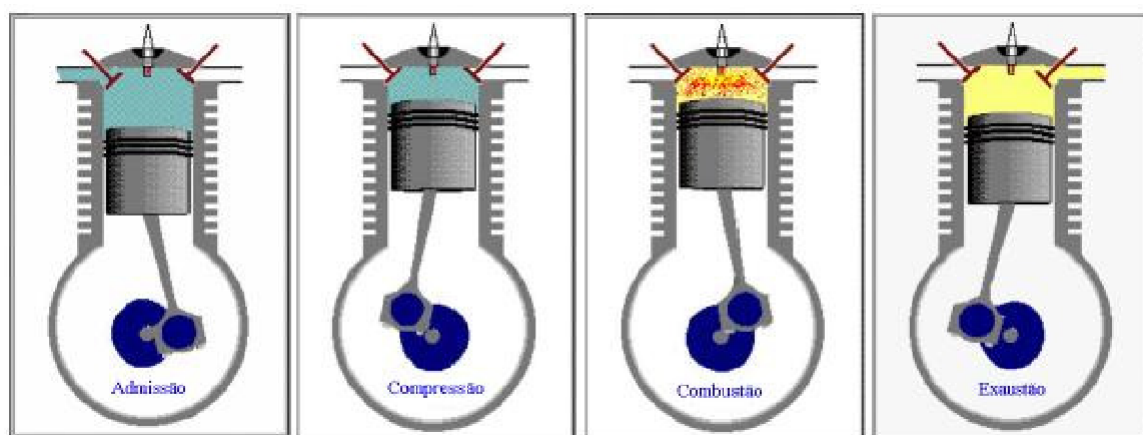


Figura 8 Desenho esquemático das etapas de funcionamento de um motor ciclo Otto.

Fonte: Pecora (2006).

Conforme Castro (2006), as 4 etapas do funcionamento do motor Otto são descritas da seguinte forma: (i) no primeiro tempo ocorre a abertura da válvula de admissão através da qual é injetada no cilindro a mistura ar-combustível e o pistão é empurrado para baixo com o movimento do virabrequim, (ii) no segundo tempo, há o fechamento da válvula de admissão e compressão da mistura (taxa da ordem de 10:1) e conforme o pistão sobe (antes de chegar à parte superior) a vela gera uma faísca, ocasionando o (iii) terceiro tempo, em que ocorre a explosão da mistura e expansão dos gases quentes formados na explosão, que promovem uma força que faz com que o pistão desça, (iv) no quarto tempo há a abertura da válvula de escape através da qual os gases são expulsos pelo pistão.

O motor estacionário é um tipo de motor de combustão interna, normalmente utilizado para mover máquinas fixas como geradores. Nesse tipo de motor, o biogás pode ser utilizado diretamente, sendo necessária, em alguns casos, a purificação do combustível. Atualmente, alguns fabricantes já possuem motores preparados para utilizar o biogás como combustível. A qualidade, temperatura, pressão do biogás, eficiência e ponto de operação do motor influenciam diretamente o consumo específico do combustível (por unidade de energia mecânica produzida), sendo importante determinar o tempo de ignição da mistura, além das características apropriadas do combustível (DIAZ, 2006).

3.7 Geração distribuída

A estrutura do sistema elétrico brasileiro por muito tempo se baseou unicamente na centralização da geração de energia. No entanto, a reestruturação do sistema elétrico, que iniciou em 2012 e foi regulamentada no Brasil pela Agência Nacional de Regulação de Eletricidade (ANEEL), possibilitou a alteração desse paradigma, trazendo novos desafios e tornando economicamente interessante a operação de geradores em paralelo com os sistemas de distribuição. Dessa forma, a geração distribuída (GD), também conhecida como geração descentralizada, passou a ser a nova configuração no setor de eletricidade.

Diante da possibilidade da utilização de novas fontes de energia que apresentem boa qualidade de fornecimento e custo acessível, o tema GD vem ganhando grande espaço.

Conforme Brasil (2004), o Artigo 14 do Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica e dá outras providências. Considera-se GD como a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, com exceção de empreendimentos: (i) hidrelétricos com

capacidade instalada superior a 30 MW e (ii) termelétricos, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a 75%. Cabe ressaltar que empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não são limitados por esse percentual.

Por meio desse Decreto, também houve o estabelecimento dos padrões de interconexão correspondentes otimizados para esses projetos de GD. Em essência, a geração de eletricidade em pequena escala (solar, eólica, hídrica, biomassa, calor e energia combinados, PCH) pode se conectar a sistemas de distribuição em todo o país por meio de um mecanismo de medição líquida, sem a necessidade de se registrar como participante do mercado de energia com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE (GARCEZ, 2017).

Com relação à venda de energia do gerador distribuído, esse mesmo Decreto autoriza a comercialização diretamente ao agente distribuidor ao qual o gerador está conectado. Acrescenta, ainda, que o distribuidor poderá contratar energia elétrica proveniente de empreendimentos de GD, num montante de até 10% de sua carga, desde que a aquisição seja precedida de chamada pública, promovida diretamente pelo agente distribuidor. Salienta-se, que tal percentual não considera o montante de energia elétrica oriundo de empreendimentos próprios de GD.

A CCEE, com a autorização da ANEEL, promove e regula os leilões de energia nova e de ajustes, os quais a GD pode participar como gerador. Além disso, pode haver comercialização da energia de forma direta entre o gerador distribuidor e consumidores livres ou comercializadores (RODRIGUES; BORGES; FALCÃO, 2007).

Existem duas formas de comercialização de energia: Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e Ambiente de Contratação Livre (ACL). De acordo com Barbosa Filho e Azevedo (2013), o ACR trata da comercialização da energia elétrica utilizada pelas companhias distribuidoras a fim de atender aos consumidores finais. Por meio desse ambiente, a forma de venda de energia passou a ser realizada por licitações com o objetivo de direcionar os contratos para empresas prestadoras de serviços públicos. No ACL, a energia elétrica é comercializada para atender aos consumidores livres, por intermédio de contratos bilaterais livremente negociados.

A Resolução Normativa nº 376/2009 ANEEL baseou o regulamento que trata das condições para contratação de energia elétrica por consumidores livres no Sistema Interligado.

A reestruturação do sistema elétrico nacional, diante de sua descentralização, oportunizou a produção de energia elétrica em pequena escala, favorecendo a utilização de fontes renováveis de energia para a geração.

A GD considera as diversas fontes de energia, não se restringindo apenas à geração hidrelétrica descentralizada, conforme Brasil (2004). Assim, cabe considerar as seguintes formas de produção:

- (i) Cogeração: consiste na produção simultânea, no processo industrial, de energia térmica e elétrica, a partir de combustíveis;
- (ii) Geração com combustíveis derivados de resíduos: por possuírem baixa densidade energética, devem que ser usados localmente (palha de arroz, resíduos da cana, gases de alto-forno e de aterros de lixo etc.).

As tecnologias que podem ser empregadas como GD são as mais variadas. Destacam-se os motores à combustão interna, as pequenas centrais hidrelétricas, os aerogeradores, os módulos fotovoltaicos, as células a combustível, os aerogeradores e as microturbinas a gás. Essa diversidade tecnológica implica uma flexibilidade quanto à fonte primária de energia a ser utilizada, permitindo o uso de insumos renováveis, como: biomassa, biogás, rejeitos sólidos, água, vento e sol; de insumos não renováveis: gás natural, diesel e gasolina (RODRÍGUEZ, 2002).

Associar a aplicação de tecnologias eficientes e que, além de atenderem às necessidades do mercado, apresentem-se como uma alternativa sustentável para a geração de energia é um dos objetivos da utilização da GD.

No entanto, os principais desafios para a adoção da tecnologia são a falta de uma política energética de longo prazo com objetivos e mecanismos adicionais de apoio. Conforme Melo, Jannuzzi e Bajay (2016), as fontes de energia não convencionais além de exigirem uma estrutura legal e regulamento abrangente, necessitam de um longo período de planejamento até sua implantação.

3.8 Avaliação econômica

A utilização de um subproduto do processo para a produção de energia é o fator econômico mais relevante por agregar valor ao que se consideraria resíduo, cuja destinação final seria o descarte no ambiente. Assim, avaliar se há compensação de custos envolvidos com a implantação de projetos que visem à eficiência energética é necessário.

Estimar os gastos envolvidos desde o investimento inicial, operação, manutenção e receitas geradas durante um determinado período em um empreendimento, consiste em fazer a avaliação econômica de um projeto. A partir dessas estimativas, pode-se montar o fluxo de

caixa relativo a esses investimentos, custos e receitas e determinar quais serão os indicadores econômicos obtidos com esse empreendimento.

Sendo assim, a análise de viabilidade econômica de um projeto consiste em verificar como está um empreendimento em relação a outras oportunidades com risco igual ou menor, a fim de saber se a sua rentabilidade é atrativa ou não. Segundo Luzio (2011), a análise de viabilidade de um projeto constitui-se em verificar se o projeto tem possibilidades de sucesso econômico-financeiro.

3.8.1 Fluxo de caixa

O fluxo de caixa é uma representação gráfica de entradas e saídas de recursos monetários ao longo de um determinado período, ou seja, uma demonstração visual de receitas e despesas distribuídas pela linha do tempo futuro (Figura 9) (MADEIRA, 2013).

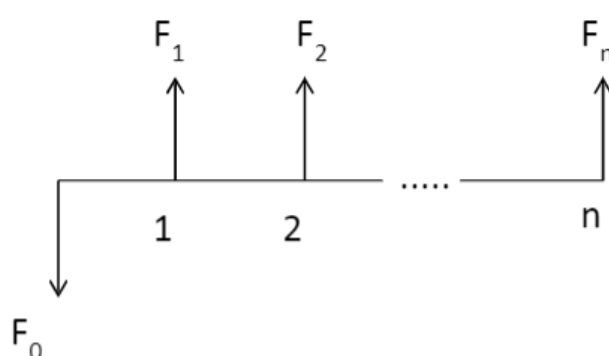


Figura 9 Representação de fluxo de caixa.

Sendo:

- F_n = caixa líquido e/ou valor residual de ordem n ;
- F_1 = caixa líquido e/ou valor residual no período 1;
- F_2 = caixa líquido e/ou valor residual no período 2;
- F_0 = investimento inicial;
- 1, 2 = períodos;
- n = período.

Conforme a Figura 9, o fluxo de caixa indica a origem de todo o dinheiro que entrou no caixa, bem como a aplicação do valor que saiu do caixa em um determinado período e, ainda, o resultado do fluxo financeiro.

O fluxo de caixa permite conhecer a rentabilidade e a viabilidade econômica de um projeto, pois resume as entradas e saídas efetivas de dinheiro ao longo de um determinado período, para o qual o empreendimento foi planejado. Ele facilita aos administradores tomarem decisões importantes de investimentos com base em uma visão futura dos recursos financeiros de uma empresa (MADEIRA, 2013).

3.8.2 Valor presente líquido

Segundo Hoji (2010), o valor presente líquido (VPL) consiste em determinar o valor no instante inicial, descontando o fluxo de caixa líquido de cada período futuro, gerado durante a vida útil do investimento, segundo uma taxa de juros i , obtendo o valor atualizado dos custos e receitas de uma alternativa.

O VPL positivo indica a viabilidade econômica do empreendimento, uma vez que a entrada de caixa é maior que o valor presente nas saídas de caixa, ou seja, gera retorno igual ou maior que o custo de capital investido. Assim, quando um projeto apresenta o VPL menor que zero, seu retorno é inferior a seu custo de capital e ele é considerado inviável.

3.8.3 Taxa interna de retorno

A taxa interna de retorno (TIR) é a taxa de desconto em que o valor presente de todos os fluxos de entrada é igual ao valor presente de todos os fluxos de saída, ou seja, a TIR é a taxa que torna o VPL de um investimento nulo.

É a taxa que torna equivalente o investimento inicial ao fluxo de caixa subsequente, ou seja, torna nulo o VPL do projeto dentro de um período estipulado (SANTOS, 1999).

Pamplona e Montevechi (2006) complementam que, para que um investimento seja considerado atrativo nesse método, é preciso que a TIR seja maior que a taxa mínima de atratividade (TMA).

3.8.4 Taxa mínima de atratividade

Pamplona e Montevechi (2006) definem a TMA como um custo de oportunidade de capital, que varia de investidor para investidor, representado sob a forma de taxa de juros na qual se pode considerar um investimento atrativo quando render, no mínimo, o equivalente a essa taxa de juros. Assim, a TMA é a taxa a partir da qual o investidor considera que está obtendo ganhos financeiros.

É uma taxa associada a um baixo risco, ou seja, qualquer sobra de caixa pode ser aplicada, na pior das hipóteses na TMA. Uma das formas de se analisar um investimento é confrontar a TIR com a TMA do investidor (CASAROTTO; KOPITKE, 1998).

3.8.5 *Payback*

Segundo Assaf Neto (2009), o *payback* consiste na determinação do tempo necessário para que o dispêndio de capital seja recuperado por meio de fluxos de caixas promovidos pelo investimento.

Esse método consiste simplesmente em quantificar, por meio do fluxo de caixa, o período necessário para recuperar o investimento feito inicialmente, ou seja, o momento em que o lucro líquido alcançado ao longo do tempo determinado se torna igual ao investimento inicial (PAMPLONA; MONTEVECHI, 2006).

Cabe salientar que esse método não permite comparar o retorno entre dois investimentos assim, não considera os fluxos de caixa gerados durante a vida útil do investimento após o período.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O Brasil possui 5570 municípios e uma população estimada em 211,8 milhões de habitantes, segundo dados do IBGE (2021a), o município de São Paulo é o mais populoso, com 12,3 milhões de habitantes, seguido pelo Rio de Janeiro (6,75 milhões), Brasília (3,05 milhões) e Salvador (2,88 milhões). Os 17 municípios do país com população superior a um milhão de habitantes concentram 21,9% da população nacional e 14 deles são capitais estaduais.

Do total de municípios brasileiros, 4395 possuem menos de 30 mil habitantes, correspondendo a, aproximadamente, 79% das cidades. Ainda, pouco mais de 15% possuem cerca de 30 a 100 mil habitantes e menos de 4% estão na faixa de 100 a 250 mil habitantes. Assim, quase 98% dos municípios são considerados de pequeno e médio porte, compreendendo as faixas populacionais 1, 2 e 3, conforme o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2021).

Para as análises deste estudo foram adotados cenários distintos, que abrangem grande parte dos municípios brasileiros, considerando as massas *per capita* de RSU gerado, por faixas de população (habitantes) em nível nacional, segundo dados do SNIS (2021), conforme Tabela 4.

Tabela 4 Massa coletada *per capita* dos municípios brasileiros em relação à população urbana, segundo faixa populacional

Faixa	Faixa de População (habitantes)	Média da massa <i>per capita</i> de RSU (Kg/hab/dia)
1	≤ 30 mil habitantes	0,99
2	entre > 30mil e ≤ 100 mil habitantes	1,01
3	entre > 100 e ≤ 250 mil habitantes	0,95
4	entre > 250 mil e ≤ 1 milhão de habitantes	1,05
5	entre > 1 milhão e ≤ 4 milhões de habitantes	1,06
6	> 4 milhões de habitantes	1,01

Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (2021).

Os primeiros cenários considerados, referem-se ao aterro municipal de Cascavel e o aproveitamento da energia gerada para compensação junto à COPEL, a partir da capacidade de produção. Os demais cenários contemplam a instalação de sistema de geração em aterros e o aproveitamento da energia elétrica para compensação junto à concessionária local, levando-se em consideração a população do município e, conseqüentemente, a quantidade de resíduos gerados, unindo capacidades distintas de produção.

Foram considerados três cenários para compensação da energia elétrica produzida a partir do biogás, levando-se em consideração o aterro municipal de Cascavel, município que possui pouco mais de 330 mil habitantes.

Cenário 1: considerou-se que o aterro sanitário municipal de Cascavel opera apenas com 20% de sua capacidade de produção de energia.

Cenário 2: considerou-se que o aterro sanitário municipal de Cascavel opera com 50% de sua capacidade de produção de energia.

Cenário 3: considerou-se que o aterro sanitário municipal de Cascavel opera com 80% de sua capacidade de produção de energia.

No caso da instalação do sistema de geração em aterros, visando ao aproveitamento da energia elétrica produzida, levando-se em consideração o número de habitantes dos municípios das 3 primeiras faixas populacionais descritas pelo SNIS (2021), foram adotados os cenários a seguir.

Cenário 4: considerou-se a instalação do sistema de geração em aterro sanitário para municípios de 30 mil habitantes e a operação com apenas 20% de sua capacidade de produção de energia.

Cenário 5: considerou-se a instalação do sistema de geração em aterro sanitário para municípios de 30 mil habitantes, operando com 50% de sua capacidade de produção de energia.

Cenário 6: considerou-se a instalação do sistema de geração em aterro sanitário para municípios de 30 mil habitantes, operando com 80% de sua capacidade de produção de energia.

Cenário 7: considerou-se a instalação do sistema de geração em aterro sanitário para municípios de 100 mil habitantes e a operação com apenas 20% de sua capacidade de produção de energia.

Cenário 8: considerou-se a instalação do sistema de geração em aterro sanitário para municípios de 100 mil habitantes, operando com 50% de sua capacidade de produção de energia.

Cenário 9: Considerou-se a instalação do sistema de geração em aterro sanitário para municípios de 100 mil habitantes operando com 80% de sua capacidade de produção de energia.

Cenário 10: considerou-se a instalação do sistema de geração em aterro sanitário para municípios de 250 mil habitantes e a operação com apenas 20% de sua capacidade de produção de energia.

Cenário 11: considerou-se a instalação do sistema de geração em aterro sanitário para municípios de 250 mil habitantes, operando com 50% de sua capacidade de produção de energia.

Cenário 12: considerou-se a instalação do sistema de geração em aterro sanitário para municípios de 250 mil habitantes, operando com 80% de sua capacidade de produção de energia.

A Tabela 5 apresenta os doze cenários admitidos para a análise de viabilidade econômica.

Tabela 5 Cenários considerados para a análise de viabilidade econômica

Localização do Aterro Sanitário	Cenários	Capacidade de aproveitamento da energia gerada (%)
Cascavel – PR	Cenário 1	20
	Cenário 2	50
	Cenário 3	80
Municípios com 30 mil habitantes	Cenário 4	20
	Cenário 5	50
	Cenário 6	80
Municípios com 100 mil habitantes	Cenário 7	20
	Cenário 8	50
	Cenário 9	80
Municípios com 250 mil habitantes	Cenário 10	20
	Cenário 11	50
	Cenário 12	80

4.1 Produção de biogás

Existem vários modelos para determinar a produção de biogás em aterros sanitários e a energia gerada no processo. No entanto, para a determinação do biogás gerado neste estudo, foram coletadas informações através das faturas de energia elétrica da unidade geradora do aterro municipal de Cascavel ao longo de 12 meses: no período de janeiro de 2019 a janeiro de 2020; os dados foram extrapolados para os demais municípios avaliados.

Conforme estudos realizados por Cortez, Lora e Gómez (2008), Abreu et al. (2009) e IEE e CENBIO (2009), considerou-se que o potencial de geração do biogás nos aterros corresponde a $75,78 \text{ m}^3\text{CH}_4 \text{ ton}^{-1}$; admitiu-se que um metro cúbico de biogás equivale a 1,43 kWh de eletricidade (OLIVEIRA, 2009). Para estimar a potência necessária a ser instalada, foi considerado que o sistema possa funcionar 15 horas diárias, durante 360 dias no ano.

O valor admitido, com relação ao preço do kWh de energia, para a análise dos 12 cenários foi baseado no grupo tarifário ao qual se encontra a unidade de geração do aterro municipal de Cascavel, considerando o período analisado, equivalente a R\$ 0,5075.

Com base nas contas de energia elétrica do aterro, foi possível obter o valor gasto de energia pelo período de 12 meses e estimar o valor economizado pelo poder público nesse

período, considerando a utilização do biogás para a geração da energia que é injetada na rede de distribuição. Cabe ressaltar que a estimativa referente ao valor dos custos evitados dos gastos com a concessionária, referentes aos demais cenários, foram calculados considerando 75% do valor total gasto, caso não fosse utilizado o biogás para a geração de energia. Esse percentual está baseado no cálculo realizado para o aterro municipal de Cascavel que, para os cenários que consideram municípios menores, pode apresentar pequenas variações de acordo com o tipo de consumidor ao qual a energia gerada no aterro é destinada.

Para os cálculos relativos aos gastos com energia no aterro, admitiu-se a alíquota do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços – ICMS, relativa ao fornecimento de energia elétrica para o Estado do Paraná, que é de 29% (vinte e nove por cento), valor fixado desde 1º de abril de 2009, cuja base de cálculo do ICMS é determinada pela Equação 1:

$$BC = A.T. \left(1 + \frac{Aliq}{100 - Aliq} \right)$$

$$BC = \frac{A.T.100}{71} \quad (1)$$

Em que:

BC = Base de cálculo do ICMS;

A = Consumo, demanda, demanda da ultrapassagem e excedente reativo, encargo de capacidade emergencial;

T = Tarifa sem ICMS;

Aliq = Alíquota => 29% (vinte e nove por cento);

Os tributos incidentes na tarifa de energia, valor a ser cobrado ao consumidor, é dado pela Equação (2).

$$T_t = \frac{T_u}{(1 - (PIS + COFINS + ICMS))} \quad (2)$$

Em que:

T_t = Tarifa com tributos;

T_u = Valor da Tarifa unitária (publicada pela ANEEL);

PIS = Valor do tributo do Programa de Integração Social;

COFINS = Valor do tributo da Contribuição para Financiamento da Seguridade Social;

ICMS = Valor do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços;

O consumo total da energia elétrica na unidade de geração é obtido pela Equação (3).

$$C_t = C_c - C_f \quad (3)$$

Em que:

- C_t = Consumo total;
- C_c = Consumo compensado;
- C_f = Consumo faturado.

A Equação (4) foi utilizada para o cálculo do valor da conta de energia do aterro sanitário, considerando a utilização do biogás transformado em energia elétrica injetado na rede de distribuição.

$$VE_{CB} = (TP + TF + TF_{ex} + U_{sd}).ICMS + (TF_{ex} + U_{sd}).(1 - ICMS) + D_i \quad (4)$$

Em que:

- VE_{CB} = Valor total da energia com a utilização do biogás;
- TP = Tarifa de energia tributada de uso do sistema de distribuição na ponta;
- TF = Tarifa de energia tributada de uso do sistema de distribuição fora da ponta;
- TF_{ex} = Tarifa de energia reativa excedente fora da ponta;
- U_{sd} = Demanda do uso do sistema de distribuição;
- $ICMS$ = Valor do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços;
- D_i = Demanda do uso do sistema de distribuição isenta de ICMS.

Para estimar o valor da conta de energia elétrica do aterro, sem a utilização do biogás para a geração de energia, considerou-se a Equação (5).

$$VE_{SB} = \frac{(VP.TC_p) + (VF.TC_f) + (D_c.T_d) + (TB_a + TB_v)}{T_t} . TF_{ex} \quad (5)$$

Em que:

- VE_{SB} = Valor total da energia sem a utilização do biogás;
- VP = Valor faturado da energia tributada na ponta;
- TC_p = Tarifa de energia de consumo na ponta;
- T_t = Tarifa com tributos;
- VF = Valor faturado da energia tributada fora da ponta;
- TC_f = Tarifa de energia de consumo fora da ponta;
- T_d = Tarifa de demanda;
- D_c = Demanda contratada;
- TB_a = Tarifa de energia bandeira amarela;
- TB_v = Tarifa de energia bandeira vermelha;
- TF_{ex} = Tarifa de energia reativa excedente fora da ponta.

4.2 Caracterização do aterro de Cascavel

O município de Cascavel situa-se no terceiro planalto do Estado, na região oeste do estado do Paraná, com altitude média de 785 metros e uma área de 2.091 km². O aterro sanitário municipal, objeto de estudo de três cenários do trabalho, está localizado na zona rural do município, na localidade de Espigão Azul, estrada Jotaesse, próximo ao km 14 e é cercado por uma plantação de eucaliptos, que separam sua área das propriedades rurais vizinhas. (Figura 10).



Figura 10 Aterro municipal de Cascavel – PR.

Fonte: Google maps (2021).

O aterro sanitário de Cascavel possui uma área de aproximadamente 237.800 m² e configura-se como o maior sítio de disposição de resíduos da região oeste do Paraná, operando desde o ano de 1995. Atualmente, o aterro recebe mais de 300 toneladas diárias de resíduos domiciliares classe II A, conforme descrito na NBR 10004 (ABNT, 2004).

A coleta dos RSUs conta com uma frota de 12 caminhões que circulam na área urbana, rural e industrial do município. Os veículos possuem um sistema interno de compactação para armazenamento temporário do RS e a coleta é realizada a cada 3 dias em residências, conforme programação, e com maior frequência em locais onde a produção diária é superior, como é o caso de condomínios residenciais.

Os RSUs são depositados no aterro que, com o intuito de reduzir de forma significativa o transporte de contaminantes no solo, possui todas as trincheiras impermeabilizadas utilizando o princípio da compactação de solo para a redução de sua permeabilidade. Os resíduos são compactados por uma esteira que os deixam em uma uniformidade sólida e, posteriormente, é coberto por uma camada de solo compactada com cerca de 1 m de

espessura, seguida de plantação de grama em sua superfície. Cada célula leva um período de 12 a 15 meses para ser preenchida com resíduos.

O chorume, resultante do processo de decomposição da matéria orgânica dos resíduos, é coletado pela base do aterro por meio de tubulações e depositado na primeira lagoa, cujo sistema de tratamento é aeróbio. A lagoa é composta por aeradores que propiciam a oxigenação da massa líquida, permitindo assim a degradação da matéria orgânica. O sistema possui capacidade para tratar $72 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ de chorume (Figura 11).



Figura 11 Lagoa aeróbia do Aterro Sanitário Municipal de Cascavel – PR.

Posteriormente, o chorume é enviado para uma lagoa facultativa para estabilização do efluente (Figura 12).



Figura 12 Lagoa facultativa do Aterro Sanitário Municipal de Cascavel – PR.

Nessa etapa do processo, a matéria orgânica de menor dimensão e dissolvida permanece dispersa na lagoa, sua decomposição ocorre pelos microrganismos aeróbios presentes na camada mais superficial. Já nas regiões de maior profundidade, o processo de degradação é realizado de forma anaeróbia.

Após a passagem pela lagoa facultativa, o efluente é utilizado na fertirrigação de gramados da cobertura do solo em áreas encerradas do aterro.

Quanto ao gás gerado, esse é coletado e convertido em energia elétrica, com auxílio de um conjunto moto-gerador. Os gases são captados por drenos verticais (Figura 13A) instalados ao longo do aterro e conduzidos por meio de canos de PVC (Figura 13B) até os moto-geradores.

a)



b)



Figura 13 a) Drenos verticais de captação do biogás no aterro; b) Canos de condução do biogás até os moto-geradores.

Vale ressaltar, que atualmente, apenas 20% da capacidade da produção de biogás do Aterro Sanitário Municipal de Cascavel está sendo aproveitada para a geração de energia, conforme informado pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente do município.

4.3 Geração de energia elétrica

O aterro possui posto de transformação de 300 kW, painel de proteção e sincronismo, 4 geradores com respectivo painel de proteção e controle de geração e uma motobomba a biogás de 40 CV de potência. Os geradores instalados são GMWM-120, fabricados pela empresa ER-BR. Cada grupo gerador possui capacidade máxima de geração de 75 kW e a

mesma especificação. O modelo do motor diesel ciclo Otto é 6.12T6C, marca MWM, e possui o sistema de injeção eletrônica programável (Figura 14).



Figura 14 Grupos geradores.

Conforme o fabricante, o gerador modelo GTA202A, marca WEG, possui eficiência de (η) para $\cos \phi = 0,8$: 91,10%. A energia elétrica gerada é medida em kWh por medidor fornecido pela COPEL e exportada para a rede, gerando créditos para uso em estabelecimentos públicos do município.

A Figura 15 ilustra o funcionamento do aterro para a geração de energia elétrica a partir do biogás.

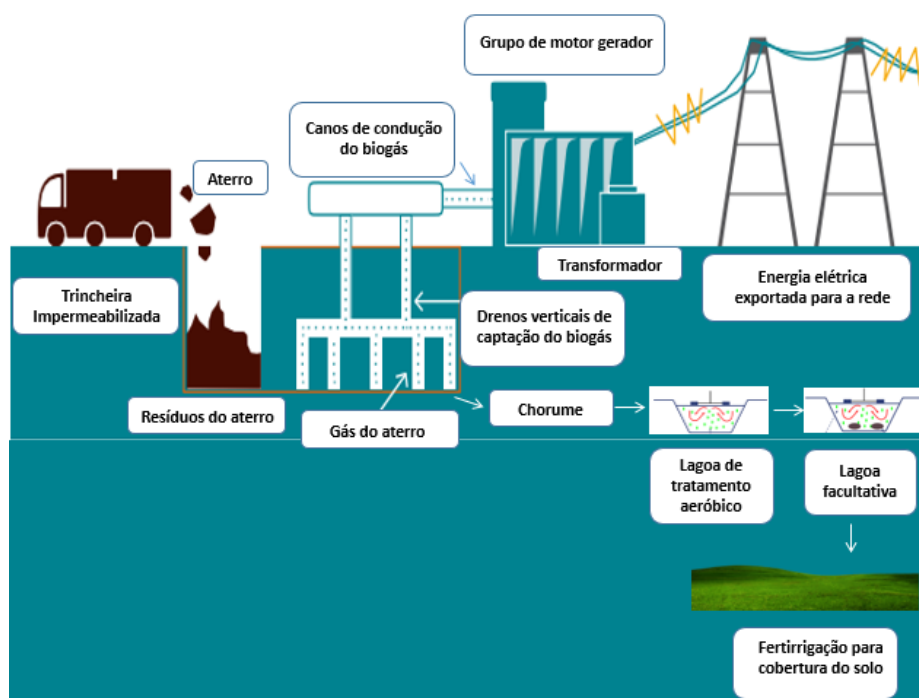


Figura 15 Esquema de funcionamento do aterro para a geração de energia.

O projeto de geração distribuída para o Aterro Sanitário Municipal de Cascavel possui capacidade de geração/transformação de 300 kW. O sistema instalado nos grupos geradores possui um sistema programado para interromper a injeção na rede caso o limite seja excedido, além de permitir o acompanhamento, em tempo real, da produção de energia em cada conjunto de equipamentos.

Além disso, por meio de reguladores, o sistema de controle eletrônico de cada grupo gerador permite configurar automaticamente a energia elétrica a ser gerada, conforme interesse do usuário, bem como realizar manobras de proteção e injeção para a energia gerada na rede de distribuição.

4.4 Avaliação econômica

Todos os custos de construção, operação e manutenção ao longo da vida útil do aterro foram considerados para realização da avaliação econômica.

Considerando os cenários propostos para o aproveitamento do biogás gerado, foi necessário estimar gastos para os custos de novo projeto e aquisição de novos equipamentos, obtidos por meio de orçamentos, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 Custos de projeto e instalação de um sistema de conexão micro geração GD para um gerador de 75 kW – Biogás

Descrição	Valor (R\$)
Projeto e aprovação na COPEL, do Sistema GD Micro Geração 75 kW - Consiste na elaboração de projeto para um sistema GD microgeração 75 kW, com aprovação na COPEL.	3.000,00
Painel de proteção da conexão GD - Compreende materiais e mão de obra para a montagem e instalação do painel de proteção com relé Pextron Urpe 6000 e instalação do disjuntor motorizado.	37.382,44
Painel de paralelismo e controle do gerador - Compreende materiais e mão-de-obra para montagem de um quadro de comando para paralelismo de um gerador de 75 kW, 220 V, baseados no controlador Sices GC400Mains, o mesmo possuirá 2 contadores de 225 amperes, barramentos de cobre de 350 amperes, todos montados em caixa metálica com pintura em epóxi	29.992,00
Comissionamento e <i>startup</i> - Trata-se dos testes de faseamento, checagem do funcionamento do sistema, parametrização dos relés, verificação das conexões e <i>startup</i>	4.000,00
Motor modelo 6.12, marca MWM, montado com cabeçote. Acompanha: alternador, bomba injeção diesel, motor de partida e alternador	508.750,00
Gerador 151.0/132.0/ 87.0 KVA 2/3/4 GTA202AI36 B15T SAE3 11	24.470,00
Radiador MWM 6.12 intercooler	15.500,00
Montagem de grupo gerador de energia a biogás	85.000,00
TOTAL	708.094,44

Os custos descritos na Tabela 6 totalizam R\$ 708.094,44 e correspondem a valores cotados no primeiro semestre de 2021. No entanto, além dos gastos supracitados, deve-se considerar outros investimentos para a instalação de uma planta de geração de energia a partir do biogás produzido em aterro sanitário, que englobam desde peças e matérias de captação e condução do biogás para o grupo gerador, até os custos de manutenção do aterro.

Os custos de investimentos para implantação do sistema de captação de biogás no aterro sanitário estão descritos na Tabela 7. Os valores de referência utilizados foram citados por Jacobowski (2018) e corrigidos pelo Índice de Preços ao Consumidor Amplo - IPCA que, conforme dados do IBGE (2021b), foi de 14,38% entre o período de julho de 2018 a junho de 2021.

Tabela 7 Investimentos para implantação do sistema de captação de biogás no aterro sanitário

Descrição do Item	Valor Total 2018 (R\$)	Valor Total 2021 (R\$)
Serviço de engenharia para planejamento e execução de obras	6.622,29	7.574,74
Mobilização de equipamentos e pessoal	904,48	1.034,57
Retroescavadeira para escavação de vala	11.152,80	12.756,85
Concreto usinado classe C15	5.122,55	5.859,17
Transporte com caminhão basculante - 10 m ³	163,1	186,55
Materiais para captação e condução do biogás	214.247,93	245.059,02
Total	238.213,15	272.470,91

O valor total dos custos de investimentos para implantação do sistema de captação de biogás no aterro sanitário, considerando a transformação de 75 kW, corresponde a R\$ 272.470,91. Assim, considerando os valores totais mencionados nas Tabelas 6 e 7, que envolvem os custos de projeto e instalação para o sistema de microgeração de energia e os custos de investimentos para a implantação do sistema de captação do biogás, obtém-se um custo total de R\$ 980.565,35.

Esses valores foram considerados no cálculo dos cenários propostos, conforme a demanda de cada um, sendo que os custos para a manutenção do aterro, que envolvem equipamentos, materiais e mão de obra foram estimados em 2,5% do valor do investimento inicial de cada projeto.

O custo evitado proveniente no caso da compensação dessa energia para a concessionária local foi determinado a partir da quantidade de energia gerada com o biogás produzido.

A viabilidade do empreendimento foi calculada utilizando-se o VPL, a TIR e o *Payback* descontado (NEWNAN; ESCHENBACH; LAVELLE, 2011). A Equação 6 representa o valor presente líquido:

$$VPL = \frac{F_1}{(1+i)^1} + \frac{F_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+i)^n} - F_0 \quad (6)$$

Em que:

- F_n = valor do fluxo de caixa de ordem n;
 F_0 = fluxo inicial;
 i = taxa de retomo.

A taxa de desconto que torna o valor inicial do investimento igual a zero (TIR) foi calculada pela Equação 7.

$$0 = \frac{F_1}{(1+TIR)^1} + \frac{F_2}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+TIR)^n} - F_0 \quad (7)$$

O tempo de retorno do capital investido ou *payback* descontado (n) foi calculado conforme a Equação 8:

$$n = \text{mínimo } j, \text{ tal que } \sum_{j=1}^N \frac{B_j}{(1+i)^j} \geq -FC_0 \quad (8)$$

Em que:

- B_j = benefícios futuros;
 FC_0 = investimento inicial;
 i = taxa mínima de atratividade.

A TMA adotada foi de 9% a.a, visto que, para projetos de geração de energia, a TMA utilizada, geralmente, varia de 6 a 12% a.a. e as análises das operações foram feitas para um horizonte de 30 anos (considerada a vida útil do aterro).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aterro municipal de Cascavel passou a utilizar a bioenergia no ano de 2007, mas foi só em 2017 que a energia gerada a partir do biogás passou a ser compensada com a conexão do sistema de geração com a distribuição da COPEL.

Os investimentos feitos para a geração de energia a partir do biogás foram sendo realizados de forma gradativa, na época, com custo aproximado de R\$ 900.00,00, conforme informado pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente. No entanto, como já mencionado, o aterro aproveita apenas cerca de 20% de sua capacidade de geração, dados comprovados pela análise das contas de energia do período de janeiro de 2019 a janeiro de 2020.

A energia elétrica produzida no aterro municipal e injetada na rede é destinada a 20 unidades consumidoras - espaços públicos do município que englobam desde escolas até praças públicas. O percentual de energia destinada a cada unidade está listado na Tabela 8.

Tabela 8 Percentual destinado a cada unidade consumidora da energia gerada no aterro

Unidade consumidora (UC)	Endereço	% (destinada ao local)
1	Av. Brasil, Praça do Imigrante	21
2	Rua Catanduvas, 902	3
3	Rua Pedro C. Neppel, 902	3
4	Rua Manaus, 1524	3
5	Av. Brasil, 2020	7
6	Av. Brasil, 2020	7
7	Rua Rio Grande do Sul	2,5
8	Rua Pedro C. Neppel, 325	2
9	Rodovia BR - 467, KM 107	2,5
10	Rua João XXIII, 564	3
11	Av. Assunção, 648	3,5
12	Rua Angelo Godoy, 479	3,5
13	Rua Osvaldo Cruz, 868	7
14	Rua Serra das Furnas, 1462	5,5
15	Rua Paraná, 1264	8
16	Rua Pedro Ivo, 1492	3
17	Rua Cassiano Jorge Fernandes, 1363	4
18	Rua Europa	5
19	Rua Manoel Ribas, 1255	3
20	Rua Marechal Floriano, 3634	3,5
TOTAL		100

O percentual destinado para cada unidade consumidora é diretamente proporcional ao seu consumo; assim, quanto maior o consumo da unidade, mais energia é destinada a ela.

A Tabela 9 apresenta os dados do consumo total, faturado e compensado das UCs da energia gerada no aterro, bem como o valor gasto na conta de energia com a utilização do biogás produzido e a estimativa do valor que seria gasto considerando a não utilização do biogás para a geração de energia. A partir desses dados, foi calculada a economia gerada ao município de Cascavel no período de janeiro de 2019 a janeiro de 2020.

Tabela 9 Dados relativos ao aterro municipal de Cascavel – PR do período de janeiro de 2019 a janeiro de 2020

UC	Consumo total anual (kWh)	Consumo faturado anual (kWh)	Consumo compensado anual (kWh)	Sem utilização do biogás (R\$)	Com utilização do biogás (R\$)	Economia anual gerada (R\$)
Total	950713	148081	802792	710.697,76	179.226,39	531.471,37

Considerando os dados apresentados na Tabela 9 pode-se perceber que a economia gerada para o município de Cascavel no período de janeiro de 2019 a janeiro de 2020, com a utilização do biogás produzido no aterro e distribuído para as unidades consumidoras, foi de mais de meio milhão de reais, correspondendo a, aproximadamente, 75% da fatura total sem a utilização da geração a biogás. Esses dados corroboram o estudo realizado por Souza (2020) que aponta que a economia do município com energia elétrica, utilizando a energia gerada no aterro e injetada na rede, corresponde a R\$ 54.684,80 mensais.

5.1 Análise dos cenários

5.1.1 Cenário 1, 2 e 3 – Cascavel

Para a análise dos cenários 1, 2 e 3, que compreendem o aterro municipal de Cascavel, considerou-se uma população de 336.073 habitantes, conforme estimativa do IBGE (2021c). Segundo dados do SNIS (2021), a média da massa *per capita* de RSU, para municípios com população entre 250 mil e ≤ 1 milhão de habitantes, que compreendem a faixa 4, é de $1,05 \text{ kg.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$; logo, a quantidade de resíduo anual gerada corresponde a 128.799,98 toneladas. Considerando que o potencial de geração do biogás no aterro corresponde a $75,78 \text{ m}^3\text{CH}_4.\text{ton}^{-1}$, a produção de biogás anual equivale a $9.760.462,28 \text{ m}^3\text{CH}_4.\text{ton}^{-1}$ e a geração de energia elétrica corresponde a $6.825.498,1 \text{ kWh.ano}^{-1}$.

Os resultados calculados para os cenários 1, 2 e 3, que consideram 20%, 50% e 80%, respectivamente, do aproveitamento da geração de energia elétrica no aterro, estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 Dados estimados para os cenários 1, 2 e 3

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Geração de eletricidade (kWh.ano ⁻¹)	1.365.099,62	3.412.749,05	5.460.398,48
Potência instalada (kW)	300	750	1050
Custo evitado (R\$)	537.025,76	1.342.564,40	2.148.103,04
Investimento Inicial (R\$)	1.414.172,86	3.931.415,06	5.334.572,00
Custo de operação e manutenção (R\$)	35.354,32	98.285,38	133.364,30
VPL (R\$)	3.739.825,95	8.851.877,16	15.364.156,80
TIR (%)	35,47	31,64	37,77
<i>Payback</i> (anos)	4	4	4

Conforme dados da Tabela 10, todos os cenários analisados para o aterro municipal de Cascavel apresentam-se viáveis economicamente, uma vez que todos os VPLs são positivos e as TIRs se mostram maior que a TMA do empreendimento.

Pode-se observar no cenário 1 que uma potência instalada de 300 kW, comporta a geração de 1.365.099,62 kWh.ano⁻¹, sendo que é necessário um investimento inicial de R\$ 1.414.172,86 para tal. O custo de operação e manutenção para esse investimento corresponde a R\$ 35.354,32 ao ano e o custo evitado de gastos anuais para o poder público municipal equivale a R\$ 537.025,76, nessas condições. Já o VPL foi de R\$ 3.739.825,95, a TIR 35,47% e o *payback* descontado de 4 anos, demonstrando a viabilidade do investimento.

Com relação ao cenário 2, nota-se que, utilizando 50% da capacidade do aterro, a geração de eletricidade corresponde a 3.412.749,05 kWh.ano⁻¹, o que demanda uma potência instalada de 750 kW. Nesse caso, é necessário um investimento inicial de R\$ 3.931.415,06, sendo que o custo de operação e manutenção para tal é de R\$ 98.285,38 ao ano. Observa-se ainda que, nesse cenário, há um custo evitado de R\$ 1.342.564,40 ao ano. Pode-se verificar que o *payback* descontado corresponde a 4 anos, o VPL é de R\$ 8.851.877,16 e a TIR é de 31,64%, comprovando sua viabilidade econômica.

Para o cenário 3, observa-se que a geração de eletricidade corresponde a 5.460.398,48 kWh.ano⁻¹, considerando 80% do aproveitamento da geração do aterro, com potência instalada de 1050 kW para tal. Nessas condições, é necessário um investimento inicial de R\$ 5.334.572,00, sendo que o custo de operação e manutenção para esse investimento corresponde a R\$ 133.364,30 ao ano. O custo evitado de gastos para o poder público municipal, nessas condições, é de R\$ 2.148.103,04 ao ano. Semelhantemente ao cenário 1 e 2, o cenário 3 também apresenta o *payback* de 4 anos. No entanto, o VPL no cenário 3 é superior, correspondendo a R\$ 15.364.156,80 e a TIR 37,77%, tornando-o economicamente viável.

Comparando os cenários que consideram o aterro municipal de Cascavel, vale ressaltar que no cenário 1, mesmo utilizando 20% da capacidade de produção do biogás gerado, retratando a realidade atual do aterro, o investimento apresentou-se viável. Com relação ao tempo de retorno do investimento, os três cenários se assemelham, apresentando um *payback* de 4 anos.

Considerando o cenário 2, cabe salientar que o valor relativo ao custo de investimento inicial, foi superior em 64% ao apresentado no cenário 1, enquanto com relação ao cenário 3 o valor foi superior em 26%. Ou seja, o dispêndio financeiro para a instalação de mais grupos geradores para, conseqüentemente, viabilizar o aproveitamento de 50% do biogás gerado no aterro do cenário 1 para o 2 foi muito superior, evidenciando assim que a TIR se apresentasse a menor dos três cenários analisados.

A Figura 16 traz o valor acumulado dos fluxos de caixa, convertidos a valor presente para os cenários 1, 2 e 3.

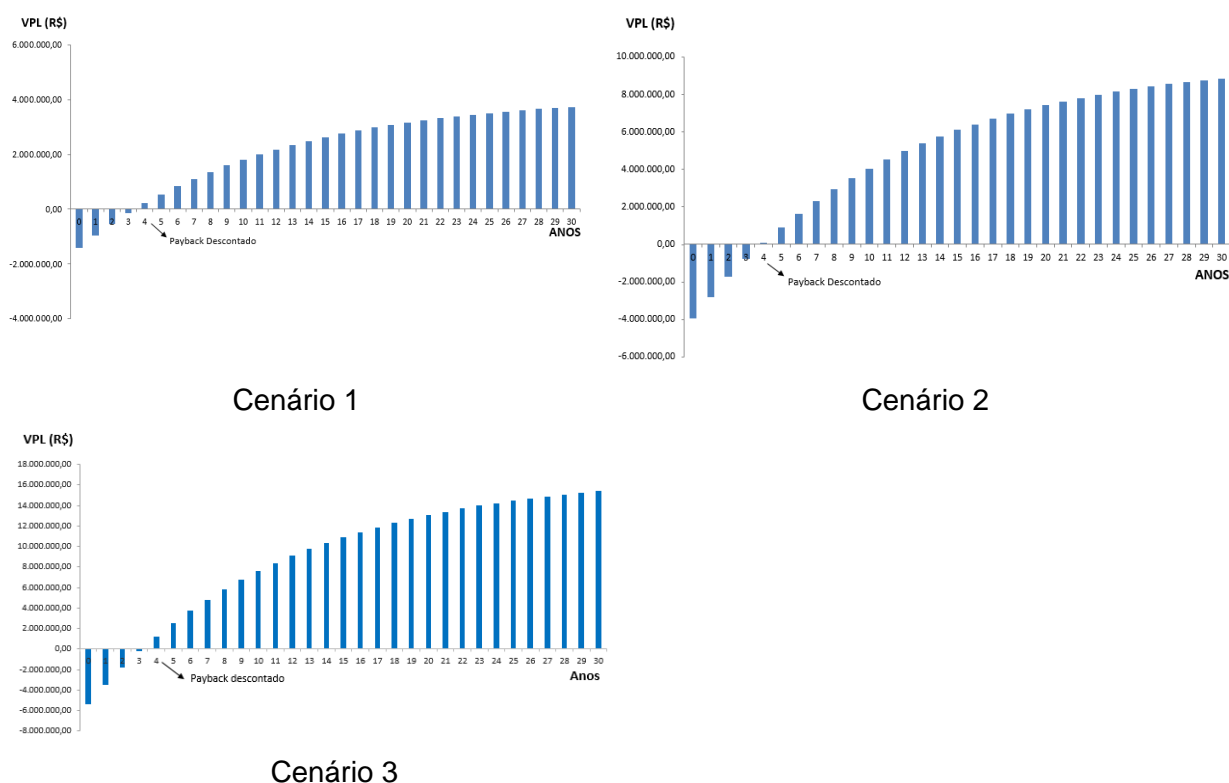


Figura 16 Valor acumulado dos fluxos de caixa convertidos a valor presente para os cenários 1,2 e 3.

Pela Figura 16, verifica-se que o fluxo de caixa, para todos os cenários, passa a ser positivo no quarto ano do investimento, ou seja, o tempo necessário para que o dispêndio de capital seja recuperado nesses cenários, corresponde a 4 anos. Ainda, fica evidente que o maior VPL apresentado foi no cenário 3, que aproveita 80% da capacidade de geração de energia.

5.1.2 Cenário 4, 5 e 6 – municípios com 30 mil habitantes

Para a análise dos cenários 4, 5 e 6, que consideram municípios com 30 mil habitantes, admitiu-se que a média da massa *per capita* de RSU, conforme dados do SNIS (2021) é de 0,99 kg.hab⁻¹.dia⁻¹; logo, a quantidade de resíduo anual corresponde a 10.840,5 toneladas. Uma vez que o potencial de geração do biogás em aterros sanitários corresponde a 75,78 m³CH₄.ton⁻¹, a produção de biogás anual para municípios de 30 mil habitantes é de 821.493,09 m³CH₄.ton⁻¹ e a geração de eletricidade corresponde a 574.470,69 kWh.ano⁻¹, considerado que um metro cúbico de biogás equivale a 1,43 kW de eletricidade.

Na Tabela 11 estão apresentados os dados estimados para os cenários que consideram municípios de 30 mil habitantes.

Tabela 11 Dados estimados para os cenários 4, 5 e 6

	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Geração de eletricidade (kWh ano ⁻¹)	114.894,14	287.235,35	459.576,55
Potência instalada (kW)	75	75	150
Custo evitado (R\$)	43.731,58	109.328,95	174.926,33
Investimento inicial (R\$)	980.565,35	980.565,35	1.125.101,19
Custo de operação e manutenção (R\$)	24.514,13	24.514,13	28.127,53
VPL (R\$)	-783.131,94	-109.207,23	383.058,86
TIR (%)	-3,13	7,72	12,68
Payback (anos)	-	-	14

Em relação aos dados da Tabela 11, verifica-se no cenário 4 que, para uma potência instalada de 75 kW e geração de eletricidade correspondente a 114.894,14 kWh.ano⁻¹, é necessário um investimento inicial de R\$ 980.565,35, sendo que o custo de operação e manutenção para esse investimento corresponde a R\$ 24.514,13 ano. Ainda, cabe ressaltar que o custo evitado de gastos para o poder público municipal equivale a R\$ 43.731,58 ao ano, nessas condições. Verifica-se que o VPL foi negativo: R\$ -783.131,94, ou seja, a instalação do sistema de geração em aterro sanitário, visando ao aproveitamento dos RSUs para a geração de energia elétrica, nessas condições, não se apresenta economicamente viável.

Considerando o cenário 5, pode-se observar que, para o aproveitamento de 50% da capacidade de geração de energia, equivalente a 287.235,35 kWh.ano⁻¹, é necessária uma potência instalada de 75 kW, que corresponde a um investimento inicial de R\$ 980.565,35. Uma vez que o custo de operação e manutenção é 2,5% do investimento inicial, semelhante ao cenário 4, esse valor se manteve em R\$ 24.514,13 ano. O custo evitado de gastos para o poder público municipal foi de R\$ 109.328,95, superior ao cenário que considera 20% do aproveitamento da energia. Ainda, pode-se observar que o VPL se manteve negativo: R\$ -109.207,23 e a TIR foi menor que a TMA, evidenciando que o aproveitamento dos RSUs,

considerando 50% da capacidade de geração de energia para municípios de 30 mil habitantes, não é uma alternativa economicamente viável.

Para o aproveitamento de 80% da capacidade de geração de energia, cenário 6, é necessário um investimento inicial de R\$ 1.125.101,19. Consequentemente, o custo de operação e manutenção nesse cenário é superior ao apresentado nos cenários 4 e 5, sendo de R\$ 28.127,53. A potência instalada, necessária para a geração de 459.576,55 kWh.ano⁻¹ de eletricidade, também é superior, correspondendo a 150 kW e o custo evitado, considerando o cenário 6, foi estimado em R\$ 174.926,33. Nesse caso, observa-se que o VPL foi de R\$ 383.058,86, a TIR 12,68% e o *payback* descontado de 14 anos. Assim, pelas condições apresentadas, a instalação do sistema de geração em aterro sanitário, visando ao aproveitamento de 80% da capacidade de geração de energia elétrica, a partir dos RSUs apresenta-se economicamente viável.

A Figura 17 traz o valor acumulado dos fluxos de caixa convertidos a valor presente para os cenários 4, 5 e 6.

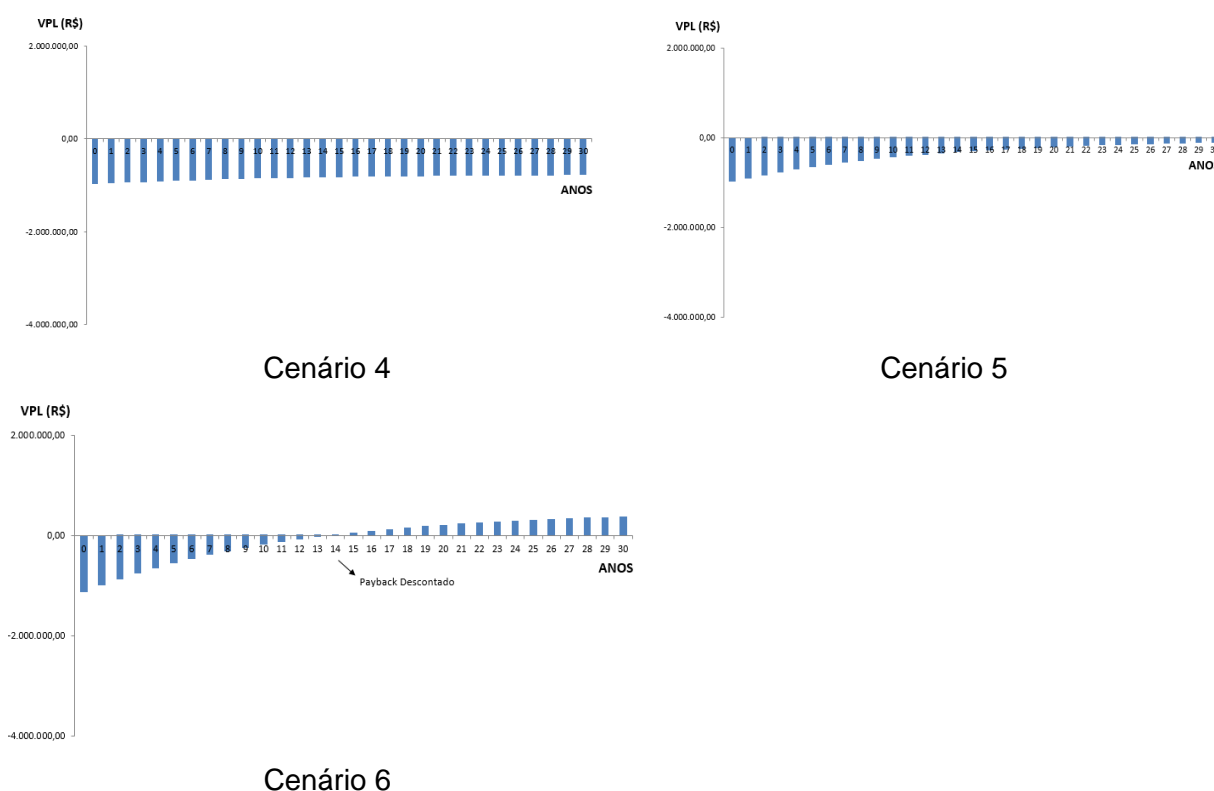


Figura 17 Valor acumulado dos fluxos de caixa convertidos a valor presente para os cenários 4, 5 e 6.

Observando-se a Figura 17, verifica-se que o cenário 6 é o único que possui VPL com saldo positivo (R\$ 383.058,86) e TIR (12,68%) superior a TMA, indicando a viabilidade do projeto. Considerando o cenário 5, cabe ressaltar que, apesar de a potência instalada se manter igual ao cenário 4 e, consequentemente, o investimento inicial e o custo de operação

e manutenção, o aproveitamento de 50% da capacidade de geração de energia não foi suficiente para apresentar um VPL positivo e viabilizar o empreendimento; logo, para os municípios de 30 mil habitantes, é necessário o aproveitamento de 80% da capacidade de geração de energia, para que o empreendimento seja economicamente viável.

5.1.3 Cenário 7, 8 e 9 - municípios com 100 mil habitantes

Os cenários 7, 8 e 9 correspondem a municípios com 100 mil habitantes. Segundo dados do SNIS (2021), a média da massa *per capita* de RSU, nesses municípios é de 1,01 kg.hab⁻¹.dia⁻¹. Nessas condições, a quantidade de resíduo anual corresponde a 36.865 toneladas. A produção de biogás anual para cidades de 100 mil habitantes é de 2.793.629,70 m³CH₄.ton⁻¹, enquanto o potencial de geração de energia por meio do biogás, corresponde a 1.953.587,20 kWh.ano⁻¹.

A Tabela 12 mostra os dados estimados para os cenários que consideram municípios de 100 mil habitantes.

Tabela 12 Dados estimados para os cenários 7, 8 e 9

	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9
Geração de eletricidade (kWh.ano ⁻¹)	390.717,44	976.793,60	1.562.869,76
Potência instalada (kW)	75	150	300
Custo evitado (R\$)	148.716,83	371.792,06	594.867,30
Investimento inicial (R\$)	980.565,35	1.125.101,19	1.414.172,86
Custo de operação e manutenção (R\$)	24.514,13	28.127,53	35.354,32
VPL (R\$)	295.450,14	2.405.589,35	4.334.069,95
TIR (%)	12,27	30,53	39,56
Payback (anos)	15	5	3

Conforme Tabela 12, no cenário 7 pode-se observar que, para o aproveitamento de 20% da capacidade de geração de energia, equivalente a 390.717,44 kWh.ano⁻¹, é necessária uma potência instalada de 75 kW, correspondente a um investimento inicial de R\$ 980.565,35. Uma vez que o custo de operação e manutenção é 2,5%, em relação ao investimento inicial, esse valor é de R\$ 24.514,13 ano. O custo evitado de gastos foi de R\$ 148.716,83. Ainda, pode-se verificar que o VPL foi de R\$ 295.450,14, com TIR de 12,27% e *Payback* de 15 anos, evidenciando que o aproveitamento dos RSUs, considerando apenas 20% da capacidade de geração de energia para municípios de 100 mil habitantes, é uma alternativa viável economicamente.

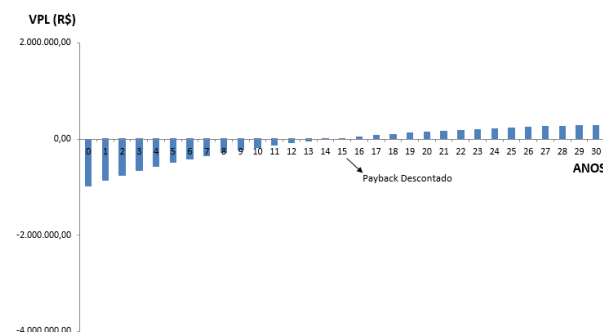
No cenário 8, pode-se observar que, considerando o aproveitamento de 50% da capacidade de geração de energia, é necessária uma potência instalada de 150 kW, com geração de eletricidade correspondente a 976.793,60 kWh.ano⁻¹. O investimento inicial, nesse caso, corresponde a R\$ 1.125.101,19 e o custo de operação e manutenção para o aterro é

equivalente a R\$ 28.127,53 ano. O custo evitado de gastos para o poder público municipal é de R\$ 371.792,06 ano. Nota-se ainda, que o VPL foi de R\$ 2.405.589,35, a TIR de 30,53% e o *payback* descontado de 5 anos, ou seja, a instalação do sistema de geração em aterro sanitário visando ao aproveitamento dos RSUs para a geração de energia elétrica, nessas condições, também se apresenta economicamente viável.

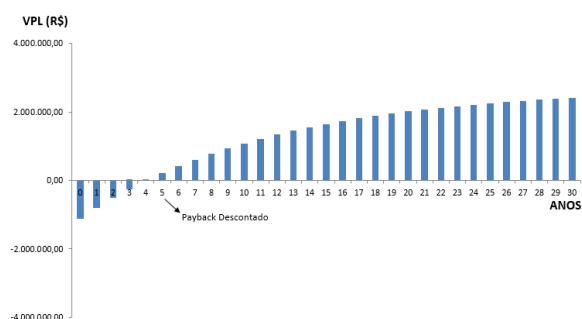
Quando considerado o aproveitamento de 80% da capacidade de geração de energia do aterro em municípios de 100 mil habitantes, cenário 9, é necessário um investimento inicial de R\$ 1.414.172,86. Consequentemente o custo de operação e manutenção nesse cenário é de R\$ 35.354,32. A potência instalada necessária para a geração de 1.562.869,76 kWh.ano⁻¹ de eletricidade, é de 300 kW, enquanto o custo evitado para esse cenário foi de R\$ 594.867,30. O cenário 9 apresentou VPL de R\$ 4.334.069,95, TIR 39,56% e o *payback* descontado de 3 anos. Assim, pelas condições apresentadas, nesse caso, a instalação do sistema de geração em aterro sanitário, visando ao aproveitamento de 80% da capacidade de geração de energia elétrica dos RSUs, apresenta-se economicamente viável.

Verifica-se, portanto, que todos os cenários apresentados, considerando os municípios de 100 mil habitantes, apresentam-se viáveis economicamente.

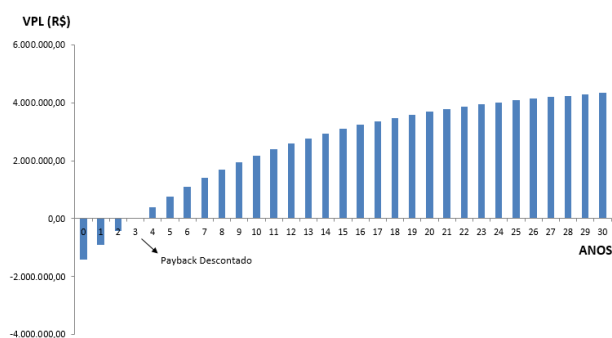
A Figura 18 traz o valor acumulado dos fluxos de caixa convertidos a valor presente para os cenários 7, 8 e 9.



Cenário 7



Cenário 8



Cenário 9

Figura 18 Valor acumulado dos fluxos de caixa convertidos a valor presente para os cenários 7, 8 e 9.

Conforme Figura 18, verifica-se que o fluxo de caixa no cenário 7 é negativo até o ano 14, ou seja, o tempo necessário para que o dispêndio de capital seja recuperado é de 15 anos. Considerando os cenários 8 e 9, o tempo de retorno para recuperação do investimento é de 5 e 3 anos, respectivamente.

Percebe-se que, apesar de todos os cenários se mostrarem viáveis economicamente, há uma diferença significativa no tempo de retorno financeiro e no VPL para o cenário 7 quando comparado aos cenários 8 e 9. Se comparado os cenários 7 e 8, nota-se que o investimento inicial e, conseqüentemente, o custo de operação e manutenção se manteve igual. No entanto, a geração de energia praticamente dobrou, passando de 459.576,55 kWh.ano⁻¹ para 976.793,70 kWh.ano⁻¹, por isso há uma diferença considerável entre o VPL e o *payback* do cenário 8 em relação ao cenário 7. Quando considerados os cenários 8 e 9, a diferença entre o tempo de retorno do investimento diminui para 2 anos e o VPL do cenário 9 foi superior ao cenário 8 em quase 2 milhões.

Ainda considerando o cenário 8, cabe ressaltar que o VPL foi superior em pouco mais de 87%, em relação ao cenário 7; porém quando comparado ao cenário 9, esse último apresentou um valor superior em quase 45% ao cenário 8. Assim, verifica-se que apesar de o cenário 9 exigir um dispêndio financeiro maior para a instalação de mais grupos geradores, a fim de viabilizar o aproveitamento de 80% do biogás gerado no aterro, quando comparado com os demais cenários, o tempo de retorno do capital investido foi menor, apresentando-se como uma possibilidade mais atrativa.

5.1.4 Cenário 10, 11 e 12 - Municípios com 250 mil habitantes

Conforme dados do SNIS (2021), a média da massa *per capita* de RSU para municípios que possuem 250 mil habitantes, correspondentes aos cenários 10, 11 e 12, é de 0,95 kg.hab⁻¹.dia⁻¹; logo, a quantidade de resíduo anual corresponde a 86.687,50 toneladas. A produção de biogás anual para municípios de 250 mil habitantes é de 6.569.178,75 m³CH₄.ton⁻¹, enquanto a geração de eletricidade corresponde a 4.593.831,29 kWh. ano⁻¹.

Na Tabela 13 estão os dados estimados para os cenários que consideram municípios de 250 mil habitantes.

Tabela 13 Dados estimados para os cenários 10, 11 e 12

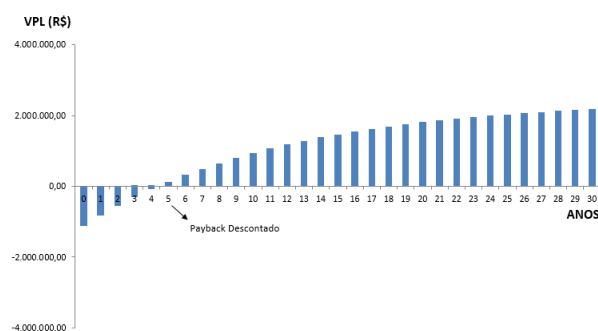
	Cenário 10	Cenário 11	Cenário 12
Geração de eletricidade (kWh.ano ⁻¹)	918.766,26	2.296.915,65	3.675.065,03
Potência instalada (kW)	150	450	675
Custo evitado (R\$)	349.705,41	874.263,52	1.398.821,63
Investimento inicial (R\$)	1.125.101,19	2.528.258,13	3.786.879,23
Custo de operação e manutenção (R\$)	28.127,53	63.206,45	94.671,98
VPL (R\$)	2.178.678,68	5.804.261,57	9.611.503,08
TIR (%)	28,57	32,07	34,43
<i>Payback</i> (anos)	5	4	4

Conforme dados da Tabela 13, para o cenário 10, que considerou um aterro sanitário em município com 250 mil habitantes, operando com 20% de sua capacidade de geração de energia, é necessária uma potência instalada de 150 kW, em que a geração de eletricidade corresponde a 918.766,26 kWh.ano⁻¹. Nesse caso, é preciso um investimento inicial de R\$ 1.125.101,19, sendo que o custo de operação e manutenção para tal empreendimento corresponde a R\$ 28.127,53 ao ano. Ainda, cabe ressaltar que o custo anual evitado de gastos, nessas condições, equivale a R\$ 349.705,41. Ainda, verifica-se que o VPL foi de R\$ 2.178.678,68, a TIR de 28,57% e o *payback* de 5 anos, ou seja, a instalação do sistema de geração em aterro sanitário, visando ao aproveitamento dos RSUs para a geração de energia elétrica, nessas condições, apresenta-se economicamente viável.

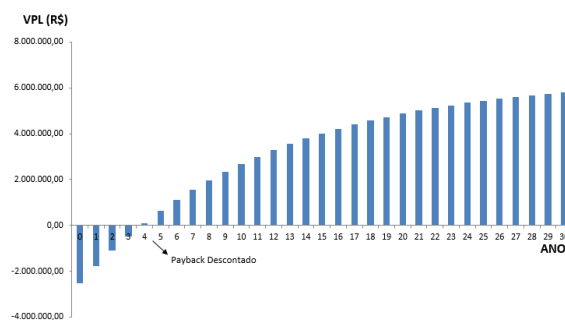
Para o cenário 11, pode-se observar que, para o aproveitamento de 50% da capacidade de geração de energia que equivale a 2.296.915,65 kWh.ano⁻¹, é necessária uma potência instalada de 450 kW, correspondente a um investimento inicial de R\$ 2.528.258,13. Uma vez que o custo de operação e manutenção é 2,5%, em relação ao investimento inicial, tem-se R\$ 63.206,45 ano. O custo evitado de gastos para o poder público municipal foi de R\$ 874.263,52. Com relação ao VPL, nesse cenário, o valor chegou a R\$ 5.804.261,57, enquanto a TIR foi de 32,07% e o *payback* descontado de 4 anos, evidenciando que o aproveitamento dos RSUs, considerando 50% da capacidade de geração de energia para municípios de 250 mil habitantes, é uma alternativa economicamente viável.

Considerando o cenário 12, para o aproveitamento de 80% da capacidade de geração de energia é necessário um investimento inicial de R\$ 3.786.879,23. Consequentemente, o custo de operação e manutenção, nesse cenário, é superior ao apresentado nos cenários 10 e 11, sendo de R\$ 94.671,98. A potência instalada necessária para a geração de 3.675.065,03 kWh.ano⁻¹ de eletricidade também é superior, correspondendo a 675 kW. O custo evitado, considerando o cenário 12, foi estimado em R\$ 1.398.821,63. O VPL foi de R\$ 9.611.503,08, a TIR 34,43% e o *payback* descontado de 4 anos. Assim, pelas condições apresentadas no cenário 12, a instalação do sistema de geração em aterro sanitário, visando ao aproveitamento dos RSUs para a geração de energia elétrica, apresenta-se economicamente viável.

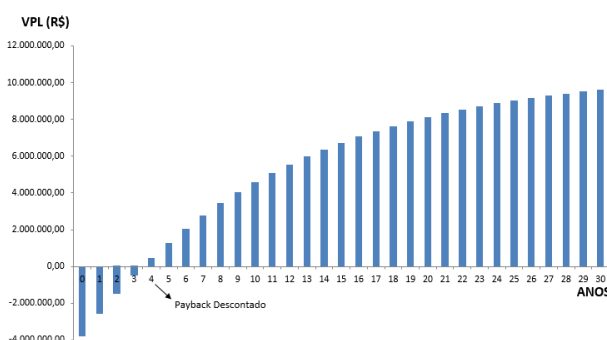
A Figura 19 traz o valor acumulado dos fluxos de caixa convertidos a valor presente, para os cenários 10, 11 e 12.



Cenário 10



Cenário 11



Cenário 12

Figura 19 Valor acumulado dos fluxos de caixa convertidos a valor presente para os cenários 10, 11 e 12.

Na Figura 19, verifica-se que o fluxo de caixa tanto do cenário 11 quanto no cenário 12 é negativo, até o terceiro ano. Assim, o tempo necessário para que o dispêndio de capital seja recuperado, nesses cenários, é de 4 anos. Com relação ao cenário 10, esse tempo foi de 5 anos. Sendo que a diferença do VPL entre os cenários, considerando o tempo de vida útil do aterro, é de mais de 3,5 milhões.

Todos os cenários se apresentam economicamente viáveis, conforme Figura 19. O cenário 12 apresenta VPL superior quando comparado aos demais cenários avaliados para municípios de 250 mil habitantes, apesar de possuir *payback* semelhante ao cenário 11.

Considerando o cenário 11, ainda, cabe ressaltar que o valor relativo ao custo de investimento inicial, foi superior em 55,5% ao apresentado no cenário 10; Se comparado ao cenário 12, esse valor foi superior em 33,2%. Consequentemente, os custos de operação e manutenção também apresentaram um crescimento considerável, em cada um desses cenários.

5.2 Comparativo entre todos os cenários (Aterro Municipal de Cascavel, municípios de 30, 100 e 250 mil habitantes)

Na Tabela 14 estão apresentados os VPL e os *paybacks* de todos os cenários analisados: Aterro Municipal de Cascavel (Cenários 1, 2 e 3); municípios com 30 mil habitantes (Cenários 4, 5 e 6); municípios com 100 mil habitantes (Cenários 7, 8 e 9) e municípios com 250 mil habitantes (Cenários 10,11 e 12), convertidos a valor presente.

Tabela 14 Valores do investimento inicial, VPL e *paybacks* de todos os cenários analisados

		Percentual de energia aproveitada (%)		
		20	50	80
Cascavel (Cenários 1, 2 e 3)	Investimento			
	Inicial			
	(R\$)	1.414.172,86	3.931.415,06	5.334.572,00
	VPL			
	(R\$)	3.739.825,95	8.851.877,16	15.364.156,80
	<i>Payback</i>			
	(anos)	4	4	4
30.000 hab. (Cenários 4, 5 e 6)	Investimento			
	Inicial			
	(R\$)	980.565,35	980.565,35	1.125.101,19
	VPL			
	(R\$)	-783.131,94	-109.207,23	383.058,86
	<i>Payback</i>			
	(anos)	-	-	14
100.000 hab. (Cenários 7, 8 e 9)	Investimento			
	Inicial			
	(R\$)	980.565,35	1.125.101,19	1.414.172,86
	VPL			
	(R\$)	295.450,14	2.405.589,35	4.334.069,95
	<i>Payback</i>			
	(anos)	15	5	3
250.000 hab. (Cenários 10, 11 e 12)	Investimento			
	Inicial			
	(R\$)	1.125.101,19	2.528.258,13	3.786.879,23
	VPL			
	(R\$)	2.178.678,68	5.804.261,57	9.611.503,08
	<i>Payback</i>			
	(anos)	5	4	4

Analisando-se os dados da Tabela 14, verifica-se que, apesar de os cenários 4, 5 e 7 terem o mesmo investimento inicial de R\$ 980.565,35, os dois primeiros não se apresentaram viáveis uma vez que o VPL apresentou saldo negativo para a vida útil do empreendimento. Por sua vez, a instalação do sistema de geração em aterro sanitário visando ao aproveitamento de apenas 20% da energia elétrica gerada a partir dos RSUs em um município de 100 mil habitantes – cenário 7, apresenta-se como uma alternativa economicamente viável, uma vez que o VPL foi de R\$ 295.450,14 e o *payback* de 15 anos. Cabe ressaltar que os

cenários 4 e 5 consideraram municípios de 30 mil habitantes, enquanto no cenário 7 foram avaliados municípios com 100 mil habitantes.

Ainda, apesar de se tratar de cenários em municípios com número de habitantes distintos (30 mil, 100 mil e 250 mil habitantes) e o aproveitamento da geração de energia considerado em cada cenário de diferentes percentuais: 80%, 50% e 20%, respectivamente, cabe salientar que o investimento inicial de R\$ 1.125.101,19 foi igual para os cenários 6, 8 e 10. Verifica-se que, nesse comparativo, quanto menor o número de habitantes, maior foi a quantidade do aproveitamento de energia considerada. Apesar dos três cenários se apresentarem viáveis economicamente, o tempo de retorno do dispêndio do capital investido para o cenário 6 foi de 14 anos e para os cenários 8 e 10 foi de apenas 5 anos. Ainda, cabe salientar que apesar de terem o mesmo *payback*, o VPL apresentado no cenário 8 foi de R\$ 2.405.589,35 e o do cenário 10 foi equivalente a R\$ 2.178.678,68.

Verifica-se, também, que os cenários 1 e 9 apresentaram investimento inicial de R\$ 1.414.172,86; no entanto, o tempo de retorno do dispêndio do capital investido é menor no cenário 9, correspondendo a 3 anos. O VPL do cenário 9 também se mostrou superior ao apresentado no cenário 1, sendo uma diferença de R\$ 594.244,00. Vale ressaltar que o cenário 1 considera o aproveitamento de 20% da capacidade de geração no município de Cascavel – PR, que possui população acima de 300 mil habitantes, enquanto o cenário 9 avalia municípios com 100 mil habitantes com a capacidade de aproveitamento de 80% da energia gerada a partir dos RSUs.

O maior VPL apresentado na Tabela 14 é de R\$ 15.364.156,80, observado no cenário 3 que avalia o aterro municipal de Cascavel-PR, com o aproveitamento de 80% da capacidade de geração de energia. Nesse cenário, o investimento inicial também é o mais alto, quando considerado todos os cenários avaliados. No entanto, não se pode afirmar que existe um aumento proporcional entre o investimento inicial e o VPL, uma vez que, quando compararmos os cenários 2 e 12, essa suposição não é válida.

Apesar de os cenários 2 e 12 não apresentarem o mesmo valor de investimento inicial, visto que o cenário 2 apresenta um valor superior em R\$ 144.535,83, essa diferença é considerada relativamente baixa, tendo em vista que o custo inicial de implantação do empreendimento, considerando esses cenários, é superior a 3,5 milhões. Quando comparados, os VPL apresentam valores bem similares: o cenário 2 possui VPL de R\$ 8.851.877,16 e o cenário 12 possui VPL de R\$ 9.611.503,08. Ainda, o *payback* de ambos os cenários foi de 4 anos. Observa-se que o cenário 12 considera 80% do aproveitamento da capacidade de geração de energia no aterro em município de 250 mil habitantes, enquanto o cenário 2, considera o aterro municipal de Cascavel – PR, que possui mais de 300 mil habitantes, aproveitando 50% da capacidade de geração de energia a partir dos RSUs. Assim,

apesar de considerar percentuais diferentes, os cenários avaliados tiveram respostas muito similares.

Ainda de acordo com os dados da Tabela 14, dos doze cenários avaliados, oito possuem tempo de retorno do dispêndio do capital investido entre 3 e 5 anos, enquanto apenas dois cenários possuem *payback* igual ou superior a 14 anos. Dois cenários se mostraram inviáveis economicamente (cenários 4 e 5), sendo que, além de considerar o aproveitamento de 20% e 50% da capacidade de geração de energia, respectivamente, esses cenários correspondem a municípios com 30 mil habitantes.

A Figura 20 permite visualizar a relação do VPL em cada um dos cenários analisados, ao longo da vida útil do empreendimento.

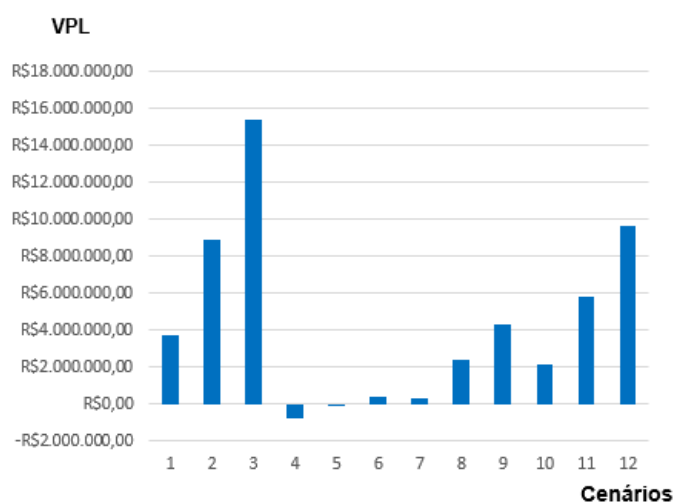


Figura 20 Valores do VPL de todos os cenários analisados ao longo da vida útil do empreendimento.

A Figura 20, apresenta graficamente os valores do VPL dos doze cenários avaliados, destacando-se o cenário 3, que se apresentou superior aos demais, seguido pelo cenário 12 e posteriormente pelo cenário 2. É possível observar, ainda, que os cenários que consideram um maior percentual de aproveitamento de energia e que possuem maior número de habitantes, apresentam um VPL maior.

Cabe salientar que na análise econômica de todos os cenários avaliados, verifica-se que o custo do investimento inicial para cada empreendimento depende da potência a ser utilizada e, conseqüentemente, do número de habitantes do município e da porcentagem a ser considerada para a geração de eletricidade a partir dos RSUs.

5.3 Método de estimativa da geração de energia e o tempo de retorno do investimento para municípios de 30 até 250 mil habitantes

Diante dos cenários analisados e visando auxiliar e incentivar os municípios a buscarem a destinação correta dos resíduos sólidos urbanos, gerando energia limpa e sustentável, foram elaboradas equações que possibilitam estimar a geração de energia e o tempo necessário para o retorno do capital investido para cidades que possuem até 250 mil habitantes.

Baseado nos dados do SNIS (2021), para estimar a geração de energia, considerou-se que a massa coletada *per capita*, para municípios com menos de 250 mil habitantes, foi de $1\text{kg.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ ou $0,001\text{ ton.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$. Semelhantemente ao considerado nos cenários avaliados, também se admitiu que um metro cúbico de biogás equivale a 1,43 kW de eletricidade e que o potencial de geração do biogás nos aterros corresponde a $75,78\text{ m}^3\text{CH}_4.\text{ton}^{-1}$. Ainda, para estimar a potência necessária a ser instalada, foi considerado que o sistema funcione 15 horas diariamente, durante 360 dias no ano, ou seja, 5.400 horas por ano, sendo que se considerou uma potência mínima de instalação de 75 kW.

Assim, a Equação 9 representa a geração de energia (y) em Kwh.ano^{-1} em função do número de habitantes no município (x):

$$y = \frac{(365)(0,001)(75,78)x}{1,43}$$

$$y = 19,35x \quad (9)$$

Em que:

y = geração de energia, Kwh.ano^{-1} ;
x = número de habitantes.

Dessa forma, pela Equação 9 pode-se estimar a geração de energia (y) a partir do biogás obtido pelos RSUs, tendo apenas o número de habitantes do município (x).

O *payback* descontado (P_{BD}) ou tempo de retorno do capital investido para o empreendimento, também, pode ser calculado em função do número de habitantes, conforme a Equação 10:

$$P_{BD} = \frac{\ln\left(\frac{U}{U - Pi}\right)}{\ln(1 + i)} \quad (10)$$

Em que:

U = custo evitado anual, R\$;
P = valor do investimento inicial, R\$;

i = taxa mínima de atratividade.

A taxa mínima de atratividade (i) foi considerada 9% a.a., para todos os cenários analisados e optou-se em mantê-la para o cálculo dessa estimativa, uma vez que, para projetos de geração de energia, essa taxa geralmente varia de 6 a 12% a.a.

O valor do investimento inicial (P) corresponde ao custo total inicial para a instalação do empreendimento que, como já mencionado, depende de outros fatores como: número de habitantes do município a ser avaliado; porcentagem do aproveitamento de energia, para determinação da geração de energia e, conseqüentemente, da potência necessária a ser utilizada para a implantação do sistema de geração. Tais parâmetros estão descritos nas Tabelas 15 e 16.

A Tabela 15 apresenta a potência necessária para a geração da energia elétrica a partir do número de habitantes do município considerado e da porcentagem do aproveitamento utilizado.

Tabela 15 Potência necessária para a geração da energia elétrica a partir do número de habitantes e da porcentagem do aproveitamento utilizado

(continua)

Número de Habitanes	Geração de energia	20%	50%	80%
30.000	572.100	75	75	150
35.000	667.450	75	75	150
40.000	762.800	75	75	150
45.000	858.150	75	150	150
50.000	953.500	75	150	150
55.000	1.048.850	75	150	225
60.000	1.144.200	75	150	225
65.000	1.239.550	75	150	225
70.000	1.334.900	75	150	225
75.000	1.430.250	75	150	225
80.000	1.525.600	75	150	300
85.000	1.620.950	75	150	300
90.000	1.716.300	75	225	300
95.000	1.811.650	75	225	300
100.000	1.907.000	75	225	300
105.000	2.002.350	75	225	300
110.000	2.097.700	150	225	375
115.000	2.193.050	150	225	375
120.000	2.288.400	150	225	375
125.000	2.383.750	150	225	375
130.000	2.479.100	150	300	375
135.000	2.574.450	150	300	450
140.000	2.669.800	150	300	450

(conclusão)

Número de Habitantes	Geração de energia	20%	50%	80%
145.000	2.765.150	150	300	450
150.000	2.860.500	150	300	450
155.000	2.955.850	150	300	450
160.000	3.051.200	150	300	525
165.000	3.146.550	150	300	525
170.000	3.241.900	150	300	525
175.000	3.337.250	150	375	525
180.000	3.432.600	150	375	525
185.000	3.527.950	150	375	525
190.000	3.623.300	150	375	600
195.000	3.718.650	150	375	600
200.000	3.814.000	150	375	600
205.000	3.909.350	150	375	600
210.000	4.004.700	150	375	600
215.000	4.100.050	225	450	675
220.000	4.195.400	225	450	675
225.000	4.290.750	225	450	675
230.000	4.386.100	225	450	675
235.000	4.481.450	225	450	675
240.000	4.576.800	225	450	750
245.000	4.672.150	225	450	750
250.000	4.767.500	225	450	750

A Tabela 16 apresenta o custo total do investimento inicial (P), já considerando o percentual de aproveitamento de energia e o número de habitantes do município, a partir da potência instalada.

Tabela 16 Custo total do investimento de acordo com a potência instalada

Custo total do investimento (R\$)	Potência (kW)
980.565,35	75
1.125.101,19	150
1.269.637,02	225
1.414.172,86	300
2.383.722,29	375
2.528.258,13	450
2.672.793,96	525
2.817.329,80	600
3.786.879,23	675
3.931.415,06	750
4.075.950,90	825
4.220.486,74	900
5.190.036,17	975
5.334.572,00	1050
5.479.107,84	1125
5.623.643,67	1200

Para saber o valor do investimento inicial (P), basta saber o número de habitantes (x) do município avaliado e definir qual será o percentual de energia a ser aproveitada (a), a partir disso, por meio da Tabela 15, obtêm-se a potência necessária para a instalação. Com a potência definida, basta consultar a Tabela 16, para saber o custo do investimento a ser considerado dentro do cenário proposto.

Para o cálculo do valor do custo evitado anual (U), admitiu-se que a tarifa corresponde a R\$ 0,40 kWh (razão entre o custo evitado e a quantidade de energia elétrica considerada no cenário analisado). Esse valor foi obtido a partir dos resultados das análises das contas de energia elétrica do aterro municipal de Cascavel, estabelecendo-se a razão entre o custo evitado e a energia elétrica gerada considerada no cenário analisado.

Ressalta-se que há um custo anual de operação e manutenção do empreendimento em que se manteve o valor de 2,5% do valor do investimento inicial (P); logo tem-se a Equação 11, que determina o valor do custo evitado anual (U), como:

$$U = (0,4 \cdot y \cdot a) - 0,025 P \quad (11)$$

Substituindo y na Equação 11 que determina a geração de energia, tem-se:

$$U = (0,4 \cdot 19,35 \cdot x \cdot a) - 0,025 P$$

$$U = (7,74 \cdot x \cdot a) - 0,025 P \quad (12)$$

Logo, para o cálculo do *payback* descontado, basta substituir U (Equação 12), na Equação 10.

$$P_{BD} = \frac{\ln\left(\frac{[(7,74xa) - (0,025P)]}{[(7,74xa) - (0,025P)] - P \cdot 0,09}\right)}{\ln(1 + 0,09)}$$

$$P_{BD} = \frac{\ln\left(\frac{[(7,74xa) - (0,025P)]}{[(7,74xa) - (0,025P)] - 0,09P}\right)}{\ln(1,09)} \quad (13)$$

Sabendo o número de habitantes (x) do município e definindo o percentual de energia a ser aproveitada (a) no aterro, conforme já mencionado, pode-se obter o custo do investimento inicial. Com esses dados, aplicados na Equação 13, obtêm-se o tempo de retorno do capital investido, ou seja, o *payback* descontado.

Tais equações devem auxiliar e fornecer parâmetros aos municípios de pequeno e médio porte, que representam a grande maioria dos municípios brasileiros, a fim de estimar dados que permitam vislumbrar que a instalação do sistema de geração de energia elétrica em aterros sanitários, além de propiciar uma destinação adequada aos RSUs pode se apresentar como uma alternativa sustentável de geração de energia e economicidade para os cofres públicos.

6 CONCLUSÃO

Por meio da avaliação realizada, obtiveram-se bons resultados que evidenciam a viabilidade econômica da utilização do biogás, produzido pelos resíduos sólidos urbanos nos aterros sanitários, para a geração de energia elétrica em municípios de 30 mil, 100 mil e 250 mil habitantes.

As análises realizadas indicam que, quanto maior o número de habitantes no município e maior aproveitamento do biogás gerado, maior será o VPL e, consequentemente, a viabilidade do empreendimento.

O método de estimativa da geração de energia e o tempo de retorno do investimento para municípios de 30 até 250 mil habitantes, permite vislumbrar o melhor cenário, dentro das condições peculiares de cada cidade, para a instalação do sistema de geração de energia elétrica em aterros sanitários que além de proporcionar a destinação adequada dos resíduos, ainda possibilita o aproveitamento da energia elétrica gerada.

REFERÊNCIAS

- ABREU, F. C.; PECORA, V.; VELÁZQUEZ, S.; COELHO, S.T. **Biogás de aterro para geração de eletricidade e iluminação**. São Paulo: Universidade de São Paulo. Instituto de Eletrotécnica e Energia / Centro Nacional de Referência em Biomassa - IEE/CENBIO, 2009. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/projetos/aterro.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa n. 376**, 2009. Disponível em: < <https://www.canalenergia.com.br/biblioteca/37115858/resolucao-aneel-3762009>>. Acesso em: 14 mar. 2021.
- ARAYA, M. N. A review of effective waste management from an EU, national, and local perspective, and its influence: the management of biowaste and anaerobic digestion of municipal solid waste. **Journal of Environmental Protection**, v. 9, p. 652-670, 2018.
- ASSAF NETO, A. **Finanças corporativas e valor**. São Paulo: Atlas, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020.
- _____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. São Paulo: ABRELPE, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8849**: Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1985.
- _____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- BARBOSA FILHO, W. P.; AZEVEDO, A. C. S. Geração distribuída: vantagens e desvantagens. In: SIMPÓSIO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS NA AMAZÔNIA, 2, 2013, Belém. **Anais...** Belém: Universidade do Estado do Pará, 2013.
- BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; SILVA, T. R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, v. 65, p. 150 - 164, fev. 2014.
- BARROS, R. T.; ASSIS, C. A.; BARROS, E. L.; SANTOS, F. N. B. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos em municípios do Vale do Jequitinhonha (MG). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24. 2007. Belo Horizonte – MG. **Anais...** Belo Horizonte – MG: ABES, 2007.
- BIDONE, F. **Resíduos sólidos provenientes de coletas especiais**. Rio de Janeiro: RIMA, 2001.

BRASIL. Decreto nº. 5.163, de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília – DF, 2004. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/dec20045163.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2019.

BRASIL. Lei nº. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília – DF, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 19 ago. 2019.

BRITO FILHO, L. F. **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. 2005. 222 f. Dissertação (Mestrado de Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

BRITO, M. **Manual de compostagem**. Escola Superior Agrária de Ponte de Lima (ESALP). Ponte de Lima – PT. Disponível em: <http://www.ci.esapl.pt/mbrito/compostagem/Manual_de_compostagem%20capa.htm>. Acesso em: 10 ago. 2010.

CALDERONI, S. **Os bilhões perdidos no lixo**. 3.ed. São Paulo: Humanitas, 1999.

CARDOSO, O. **Gestão dos resíduos sólidos urbanos do município de Campo Mourão/PR**. 2004. 143 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2004.

CARMO JUNIOR, G. N. R. **Aterro sanitário**. Rio de Janeiro, 2012. 49 slides, color. Disponível em: <www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/09/AS-_Aula-9.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2016.

CASAROTTO, N. F.; KOPITKE, B. H. **Análise de Investimentos**: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial. 8. ed. São Paulo: Atlas, 1998.

CASTILHOS JÚNIOR, A. B. **Resíduos sólidos urbanos**: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Rio de Janeiro: Rima; ABES, 2003.

CASTILHOS JÚNIOR, A.B. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água**: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 494p.

CASTRO, R. **Energias renováveis e produção descentralizada**. Lisboa – PT: Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico. DEEC. Secção de Energia, 2006.

CHEN, M.; XU, P.; ZENG, G.; YANG, C.; HUANG, D.; ZHANG, J. Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: applications, microbes and future research needs. **Biotechnology Advances**, v. 33, p. 745–755, nov. 2015.

COMPANHIA MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA - COMLURB -. **Caracterização gravimétrica e microbiológica dos resíduos sólidos domiciliares do município do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: COMLURB, 2008.

CONRAD, J. Protecting groundwater resources using geographic information systems – case study: regional waste site identification, Western Cape. **Freshwater Resources**, 2000.

CONSONI, A. J.; PERES, C. S.; CASTRA, A. P. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 3. ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2010.

CORREA, A. S. **A influência da folga de válvulas na geração de ruído e vibração no motor Fire 999cc 8v**. 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/85630/197259.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 31 ago. 2019.

CORTEZ, C. L. **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia: estudo de caso AES Eletropaulo**. 2011. 246 f. Tese (Doutorado em Energia) - Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S.; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2008.

CUNHA, M. A.; CONSONI, A. J. Os estudos do meio físico na disposição de resíduos. In: BITAR, O. Y. **Curso de Geologia aplicada ao meio ambiente**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia e Engenharia (ABGE) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 1995. Cap. 4, 6, p. 217-227.

DEMIRBAS, A. Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes. **Energy Conversion and Management**, v. 52, p. 1280-1287, fev. 2011.

DESIDERI, U.; DI MARIA, F.; LEONARDI, D.; PROIETTI, S. Sanitary landfill energetic potential analysis: a real case study. **Energy Conversion and Management**, v. 44, p. 1969-981, Jul. 2003.

DI MARIA, F.; DESIDERI, U.; BIDINE, G. Applicazione di una microturbina a gas ad una discarica di rifiuti solidi urbani. CONGRESSO TECNOLOGIE E SISTEMA ENERGETICI COMPLESSI, 10, Genova, 2001. **Anais...** Genova, 2001.

DIAZ, G. O. **Análise de sistemas para o resfriamento de leite em fazendas leiteiras com o uso do biogás gerado em projetos MDL**. 2006. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3150/tde-15122006-095009/pt-br.php>>. Acesso em: 31 ago. 2019.

DONHA, M. S. **Conhecimento e participação da comunidade no sistema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: o caso de Marechal Cândido Rondon/PR**. 2002. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

ELK, A. G. H. P. **Redução de emissões na disposição final**. In: Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos – Rio de Janeiro: IBAM, 2007. p. 13-25.

ENCINAS, J. I.; NÓBREGA, R. C.; COUTO JÚNIOR, A. F. Sugestão de criação de uma área de preservação ambiental na região do Ecomuseu do Cerrado. **Boletim do Herbário Ezechias Paulo Heringer**. Brasília: v. 14, 2004.

ESSENCIS SOLUÇÕES AMBIENTAIS - ESSENCIS. **Incineração**. 2010. Disponível em <<http://www.essencis.com.br>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

FERREIRA, S.; MOREIRA, N. A.; MONTEIRO, E. Bioenergy overview for Portugal. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, p. 1567 – 1576, Nov. 2009.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – Estudo de caso**. 2011. 147 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FODOR, Z.; KLEMES, J.J. Waste as alternative fuel - minimizing emissions and effluents by advanced design. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 90, p. 263–284, may. 2012.

GARCEZ, C. G. Distributed electricity generation in Brazil: an analysis of policy context, design and impact. **Utilities Policy**, v. 49, p. 104-115, dez. 2017.

GAVINO, W. R. G. **Licenciamento ambiental de aterros sanitários – Um estudo de caso no município de Pinhão – PR**. 2018. 31 f. Monografia (Especialização - MBA em Gestão Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/58677/R%20-%20E%20-%20WILLERSON%20RAPHAEL%20GIACOMITTI%20GAVINO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 15 out. 2020.

GONÇALVES, A. T. T. **Potencialidade energética dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais do município de Itajubá - MG**. 2007. 177 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

GOOGLE MAPS. **Imagem do Aterro Municipal de Cascavel – PR**. Escala livre. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-24.8504785,-53.4877736,711m/data=!3m1!1e3>>. Acesso em: 15 out. 2021.

GUERRA, G. P. B. **Lixão a céu aberto: o impacto dos resíduos sólidos no Brasil**. Florianópolis: Politize, 2018. Disponível em: < <https://www.politize.com.br/residuos-solidos-lixao-a-ceu-aberto-o-impacto-no-brasil/#:~:text=O%20lix%C3%A3o%20%C3%A9%20uma%20forma,disposi%C3%A7%C3%A3o%20final%20dos%20res%C3%AAduos%20s%C3%B3lidos>>. Acesso em: 15 out. 2021.

HERNÁNDEZ, T.; GARCIA, E.; GARCÍA, C. A strategy for marginal semiarid degraded soil restoration: a sole addition of compost at a high rate. A five-year field experiment. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 89, p. 61–71, out. 2015.

HOJI, M. **Administração financeira e orçamentária**. São Paulo: Atlas, 2010.

HU, L.; DU, Y.; LONG, Y. Relationship between H₂S emissions and the migration of sulfur-containing compounds in landfill sites. **Ecological Engineering**, v. 106, p. 17-23, set. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Panorama das cidades brasileiras**. Cascavel 2021a. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/cascavel/panorama>>. Acesso em: 10 dez. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo**. 2021b. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?=&t=destaques>>. Acesso em: 10 dez. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Estimativas da população**. 2021c. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 10 dez. 2021.

INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA - IEE. CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA - CENBIO. **Atlas de bioenergia do Brasil**. Metodologias de cálculo da conversão energética das biomassas selecionadas. São Paulo: IEE/CENBIO, 2009.

IVÁN, V. R. ; MELITÓN, E. J. ; JOSÉ, M. R. ; AGUSTINA, O. S. Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos. **Ingeniería, Investigación y Tecnología**, v.16, n. 3, p. 471-478, Jul –Set, 2015.

JACOBOWSKI, M. **Viabilidade econômica da cogeração de energia elétrica do biogás: um estudo de caso no aterro sanitário de Toledo, Paraná**. 2018. 115 f. 'Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Agronegócio) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2018. Disponível em: <<https://tede.unioeste.br/handle/tede/4048>>. Acesso em: 15 out. 2021.

JARDIM, N. S. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) / CEMPRE, 2000.

JORDÃO, C. P.; NASCENTES, C. C.; CECON, P. R.; FONTES, R. L. F.; PEREIRA, J. L. Heavy metal availability in soil amended with composted urban solid wastes. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 112, p. 309–326, Jan. 2006.

JUSTI, J. G.; MOLITERNO, M. **Geração de energia elétrica por meio de biogás extraído do aterro sanitário Bandeirantes e o mecanismo de desenvolvimento limpo como indutor de investimentos socioambientais**. 2008. 98 f. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental e Negócios no Setor Energético) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

LEME, M. M. V.; ROCHA, M. H.; LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; LOPES, B. M.; FERREIRA, C. H. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 87, p. 8–20, jun. 2014.

LIMA, J. D. **Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. Rio de Janeiro: ABES-PB: Seção Paraíba. 2001.

LIMA, L. M. Q. **Lixo**: Tratamento e biorremediação. 3. ed. São Paulo: Hemus, 2004.

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Energy and environmental potential of solid waste in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, p. 3496 - 3502, jun. 2011.

LUZIO, E. **Finanças corporativas**. Teoria e prática. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro da Muribeca - PE**. 2003 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5806>>. Acesso em: 29 ago. 2020.

MADEIRA, R. F. Restrições financeiras nas empresas brasileiras de capital aberto: a relevância da estrutura de capital para o investimento. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, n. 39, p. 69-122, jun. 2013.

MANAHAN, S.E. **Environmental Chemistry**. 6. ed. New York: CRC Press Inc, 1999.

MELO, C. A.; JANNUZZI, G. M.; BAJAY, S. V. Nonconventional renewable energy governance in Brazil: lessons to learn from the German experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 222 - 234, ago. 2016.

MENEZES, D. B. **Diagnóstico dos impactos do depósito de resíduos sólidos de São Carlos - SP, no meio físico**. 1995. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1995.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios da termodinâmica para engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

MOREDA, I.L. The potential of biogas production in Uruguay. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1580 - 1591, fev. 2016.

NADELETI, W. C.; PRZYBYLA, C.; BELLI FILHO, P.; SOUZA, S. N. M.; QUADRO, M.; ANDREAZZA, R. Methane-hydrogen fuel blends for SI engines in Brazilian public transport: potential supply and environmental issues. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, p. 12615 – 12628, abr. 2017.

NEWMAN, D.; ESCHENBACH, T.; LAVELLE, J. **Engineering Economics Analysis**. 11.ed. Oxford University Press, 2011.

OLIVEIRA, R.D. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouros e as possibilidades do mercado de carbono**. Trabalho e Conclusão de Curso. Escola de Engenharia de São Carlos USP, São Carlos, 2009.

OUDA, O. K. M.; RAZA, S. A.; NIZAMI, A. S.; REHAN, M.; AL-WAKED, R.; KORRES, N. E. Waste to energy potential: a case study of Saudi Arabia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 328-340, ago. 2016.

PAMPLONA, E.O.; MONTEVECHI, J.A.B. **Engenharia econômica I**. São Paulo, 2006.

PARO, A. C.; COSTA, F. C.; COELHO, S. T. Estudo comparativo para tratamento de resíduos sólidos urbanos: aterros sanitários x incineração. **Revista Brasileira de Energia**, v. 14, n. 2, p. 113-125, jul. – dez., 2008.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: estudo de caso**. 2006. 152f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

RANGEL, M. S. **Estudo da viabilidade econômica da geração de eletricidade por fontes renováveis no Brasil**. 2016 Trabalho Final de Graduação (Engenharia Ambiental): Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2016.

REIS, M. F. P. **Avaliação do processo de compostagem de resíduos sólidos urbanos**. 2005. 239 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

RENOU, S.; GIVAUDAN, J. G.; POULAIN, S.; DIRASSOUYAN, F.; MOULIN, P. Landfill leachate treatment: review and opportunity. **Journal of Hazardous Materials**, v. 150. n. 3, p. 468-493, fev. 2008.

RODRIGUES, F. F. C.; BORGES, C. L. T; FALCÃO, D. M. Programação da contratação de energia considerando geração distribuída e incertezas na previsão de demanda. **Revista Controle e Automação**, v.18, n. 3., 2007.

RODRÍGUEZ, C. R. C. **Mecanismos regulatórios, tarifários e econômicos na geração distribuída: o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2002. 118 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de sistemas energéticos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002. Disponível em: <http://www.professores.uff.br/dulcemar/Doc_PDF/Tarifas_Energia.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2019.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**. 2007. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1721/tese_0032785.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 31 ago. 2019.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, p. 1101 – 1107, set. 2009.

SANTOS, A. H. M. **Análise econômico-financeira de centrais termelétricas**. Itajubá: Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1999.

SCHALCH, V. LEITE, W. C. A.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; CASTRO, M. C. A. A. **Gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento da USP, São Carlos, 2002. Apostila. Disponível em: <deecc.ufc.br/Download/Gestao_de_Residuos_Solidos_PGTGA/Apostila_Gestao_e_Gerenciamento_de_RS_Schalch_et_al.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2019.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS. **Painel de indicadores**. Resíduos sólidos urbanos. 2021. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-residuos-solidos>>. Acesso em: 30 jan. 2022.

SOUZA, A. A. **Estudo de caso de geração distribuída com biogás no aterro Municipal de Cascavel – PR**. 2020. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2020. Disponível em: <<http://tede.unioeste.br/bitstream/tede/4952/5/Abel%20Alves%20de%20Souza.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2021.

SOUZA, S. N. M.; HORTTANAINEN, M.; ANTONELLI, J.; KLAUS, O.; LINDINO, C. A.; NOGUEIRA, C. E. C. Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil: landfill gas, biogas and thermal treatment. **Waste Management & Research**, v. 32, p. 1015 – 1023, 2014.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Gestión integral de residuos sólidos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1994.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Integrated solid waste management engineering principles and management issues**. Nova York: McGraw-Hill, 1993.

TENÓRIO, J. A. S.; ESPINOSA, D. C. R. Controle ambiental de resíduos. In: PHILIPPI JR, A. ROMÉRIO, M. A.; BRUNA, G. C. **Curso de gestão ambiental**. São Paulo: Manole, 2004, p. 156.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Landfill Methane Outreach Program (LMOP)**. USA. 2016. Disponível em: < <https://www.epa.gov/lmop>>. Acesso em: 3 abr. 2021.

WEI, Y.; LI, J.; SHI, D.; LIU, G.; ZHAO, Y.; SHIMAOKA, T. Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: A critical review. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 122, p. 51–65, 2017.

WILLUMSEN, H. C. **Energy recovery from landfill gas in Denmark and Worldwide**. LG Consultant, 2001.

YOUCAI, Z. ZIYANG, L. General structure of sanitary landfill. **Pollution control and resource recovery: municipal solid wastes at landfill**. p. 1-10, 2017.

ZAMORANO, M.; PÉREZ, J. I. P.; PAVÉS, I. A.; RIDAO, A. R. Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, p. 909–922, jun. 2007.