

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

PAULO RENATO DOS SANTOS MONTAGNER

**Avaliação do potencial de uso do biogás de aterro sanitário para  
geração de energia elétrica**

Lorena - SP  
2021

PAULO RENATO DOS SANTOS MONTAGNER

**Avaliação do potencial de uso do biogás de aterro sanitário para  
geração de energia elétrica**

**Versão Corrigida**

Trabalho de Graduação apresentado à Escola  
de Engenharia de Lorena da Universidade de  
São Paulo como requisito para conclusão do  
curso de graduação em Engenharia Física.  
Orientador: Prof. Dr. Humberto Felipe da Silva

Lorena - SP  
2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado  
da Escola de Engenharia de Lorena,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Montagner, Paulo Renato dos Santos  
Avaliação do potencial de uso do biogás de aterro  
sanitário para geração de energia elétrica / Paulo  
Renato dos Santos Montagner; orientador Humberto  
Felipe da Silva. - Lorena, 2021.  
79 p.

Monografia apresentada como requisito parcial  
para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia  
Física - Escola de Engenharia de Lorena da  
Universidade de São Paulo. 2021

1. Biogás. 2. Resíduo sólido urbano. 3. Energia. 4.  
Aterro sanitário. 5. Aproveitamento energético. I.  
Título. II. Silva, Humberto Felipe da, orient.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus pelo dom da existência.

Quero agora expressar minha gratidão aos meus pais, Paulo e Maria, por me trazerem a este mundo, pelo amor, compreensão e apoio que me deram ao longo de toda a vida. Por todos os ensinamentos, diretos e indiretos, por confiarem em mim, e acreditarem na minha escolha pelo curso de Engenharia Física em uma cidade tão distante da terra natal de nossa família. Pai e mãe, eu amo vocês.

Agradeço também à minha namorada, Maysa, pelo companheirismo ímpar, pelo amor e amizade. Em especial, por entender todos os momentos de minha ausência em função de minha dedicação a elaboração deste trabalho, além de contribuir com ideias claras em momentos mais confusos.

Deixo um especial agradecimento ao meu orientador, prof. Dr. Humberto da Silva, que abraçou minha proposta de projeto, e mesmo com tempo reduzido para elaboração do texto, se fez presente e participante na reta final de minha graduação.

Quero estender meu agradecimento ao meu amigo André, pela amizade, presença e apoio imprescindível em momentos difíceis ao longo dessa jornada que foi a graduação.

Aos meus amigos e irmãos que fiz ao longo de todos esses anos, em diversas situações, cada um com sua essência, participando de momentos especiais, tanto os felizes quantos os mais difíceis. Com imenso carinho, agradeço também a todos os companheiros e companheiras do grupo Huma-Unidade, os quais contribuíram com minha caminhada espiritual e de autoconhecimento.

E agradeço à prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Katia Candioto, minha supervisora do estágio na Escola de Engenharia de Lorena, a qual esteve junto comigo nos últimos semestres de minha graduação, me apoiando e orientando.

## RESUMO

Apesar de possuir uma legislação que determina o correto destino dos Resíduos Sólidos Urbanos, muitos municípios brasileiros ainda descartam seus resíduos em lixões ou aterros controlados, totalizando em 2018, cerca de 29,5 milhões de toneladas de resíduos encaminhados à locais inadequados. Essa irregularidade causa diversos danos ambientais, sobretudo a poluição do solo e das águas pluviais, além de grande liberação de gases de efeito estufa na atmosfera, como o metano e o gás carbônico, principais componentes do biogás. A implantação de aterros sanitários é uma medida que visa proteger o meio ambiente e a saúde pública, fazendo parte de uma estratégia geral de sustentabilidade. Ao realizar a contenção, seguida de tratamento, o biogás deixa de ser um passivo ambiental, e se torna um importante recurso energético, seja como combustível ou energia elétrica, e fonte de riquezas, agregando valor com a venda de créditos de carbono. Nesse sentido, foi realizada uma análise do potencial de produção de biogás no aterro de Cachoeira Paulista – SP, visando dimensionar a capacidade econômica e energética do aproveitamento deste recurso. A pesquisa foi baseada em uma análise documental, que buscou dados sobre a quantidade de resíduos que o aterro recebeu desde sua inauguração em 2006, além de informações quanto ao contexto nacional dos RSU, o perfil da matriz elétrica nacional e a participação do biogás na capacidade instalada. Assim, foi observado um crescimento expressivo na produção nacional de energia elétrica advinda do biogás, que tende a ser maior, sobretudo pela implantação de políticas de incentivo à produção de biocombustíveis, como programa RenovaBio. Por fim, com base nas estimativas, a unidade em Cachoeira Paulista tem potencial para produzir em 2023, cerca de 16.660 m<sup>3</sup>/dia de metano, o que poderia gerar 17.825 MWh de energia elétrica, o suficiente para abastecer uma população de 6,67 mil habitantes, e gerar uma receita bruta anual de R\$3,5 milhões, além de 16.634 unidades de CBios, proporcionando uma receita anual de R\$660 mil.

Palavras chaves: Biogás, Resíduo Sólido Urbano, Energia, Aterro Sanitário, Aproveitamento Energético.

## ABSTRACT

Despite having a legislation that addresses the correct disposal of Urban Solid Waste (USW), many Brazilian cities still dispose their waste in dumps or controlled landfills – in 2018 about 29.5 million tons of waste were sent to inappropriate locations. In doing so, several environmental damages are caused, especially the pollution of the soil and rainwater, in addition to a large release of greenhouse gases into the atmosphere, such as methane and carbon dioxide, those known as the main components of biogas. The implementation of landfills is an effort that aims to protect the environment and public health, as part of a general sustainability strategy. When performing containment, followed by treatment, biogas ceases to be an environmental liability, becoming an important energy resource, whether as fuel or electricity, and a source of wealth, increasing its value by selling carbon credits. In this sense, an analysis of the potential for biogas production at the Cachoeira Paulista landfill, in the state of São Paulo, was carried out, aiming to measure the economic and energy capacity of this resource. The research was based on analysis of reports and official records, which sought data on the amount of USW that the landfill has received since its inauguration in 2006, as all information regarding to national context of USW, the profile of the national electrical matrix and the percentage of biogas in the capacity installed. Thus, a significant growth was observed in the national production of electric energy from biogas, which tends to be greater in the future, especially due to the implementation of policies to promote the production of biofuels, such as the RenovaBio program. Finally, based on estimates, the landfill in Cachoeira Paulista has the potential to produce around 16,660 m<sup>3</sup>/day of methane in 2023, which could generate 17,825 MWh of electricity, enough to provide energy to a population of 6.67 thousand inhabitants, and generate an annual gross revenue of R\$ 3.5 million, additionally to 16,634 units of CBios, providing an annual revenue of R\$ 0.6 million.

Key words: Biogas, Urban Solid Waste, Energy, Landfill, Energy Utilization.

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Faixas dos valores Lo e k.....	27
Tabela 2 - Cálculos básicos da geração de Cbios .....	47
Tabela 3 - Toneladas de RSU destinadas ao aterro de Cachoeira Paulista segundo dados da CETESB .....	50
Tabela 4 - Deposição de RSU no aterro sanitário de Cachoeira Paulista .....	51
Tabela 5 - Estimativa para produção anual de gás metano .....	53
Tabela 6 - Potencial de geração de energia elétrica para o aterro de Cachoeira Paulista .....	56
Tabela 7 - Potencial de geração de CBios para o aterro de Cachoeira Paulista.....	58
Tabela 8 - Distribuição dos municípios, por tipo de disposição final adotada .....	61

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível
BEN	Balanço Energético Nacional
CBIO	Crédito de Descarbonização
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
COP21	<i>21<sup>a</sup> Conference of the Parties</i>
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gás de Efeito Estufa
GNV	Gás Natural Veicular
INDC	<i>Intended Nationally Determined Contributions</i>
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MCI	Motor de Combustão Interna
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira
NDC	Nationally Determined Contribution
ONU	Organização das Nações Unidas
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
PTI	Parque Tecnológico de Itaipú
RSU	Resíduo Sólido Urbano
UNFCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
USP	Universidade de São Paulo

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico da composição dos RSU no Brasil .....	13
Figura 2 - Lixões e suas consequências .....	16
Figura 3 - Ilustração de um aterro controlado.....	17
Figura 4 - As diferentes fases de operação de um aterro sanitário .....	18
Figura 5 - Deposição e compactação de lixo no aterro .....	19
Figura 6 - Instalação de drenos para chorume e biogás .....	21
Figura 7 - Linha de controle do sistema de gases.....	22
Figura 8 - Possíveis aproveitamentos econômicos do uso do biogás de aterro.....	24
Figura 9 - Vista aérea Termoverde Caiéiras.....	24
Figura 10 - Conjunto Motogerador do tipo MCI .....	35
Figura 11 - Sequência de cálculos para obtenção do potencial de geração de gás metano .....	43
Figura 12 - Sequência de cálculos para estimativa da produção de energia elétrica	45
Figura 13 - Sequência de cálculos para obtenção do número de CBios .....	46
Figura 14 - Acumulado de RSU no aterro de Cachoeira Paulista de 2006 a 2019 (CETESB) e entre 2020 e 2035 (projeção) .....	52
Figura 15 - Gráfico do potencial de produção anual de gás metano (m <sup>3</sup> ) .....	55
Figura 16 - Gráfico do potencial de geração anual de energia elétrica em MWh .....	57
Figura 17 - Gráfico do potencial de produção anual de CBios .....	60
Figura 18 - Disposição final do montante de RSU, por tipo de destinação em 2018.	61
Figura 19 - Distribuição percentual dos municípios quanto a disposição final dos RSU.....	62
Figura 20 - Gráfico da distribuição da oferta interna de energia.....	63
Figura 21 - Gráfico da participação das fontes na capacidade instalada .....	63
Figura 22 - Capacidade elétrica instalada para produção com biogás (MW) .....	64
Figura 23 - Percentual de participação do biogás dentro da fração de biomassa .....	65
Figura 24 - Aplicação do volume de produção de biogás.....	66
Figura 25 - Evolução da capacidade instalada de aproveitamento de biogás.....	66
Figura 26 - Número de plantas segundo capacidade de operação .....	67
Figura 27 - Percentual de participação das plantas de biogás segundo capacidade de operação .....	67
Figura 28 - Origem do biogás produzido .....	68

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	10
1.1.	Objetivo geral .....	12
1.2.	Objetivos específicos.....	12
2.	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	13
2.1.	Locais de disposição final.....	15
3.	BIOGÁS A PARTIR DO RSU .....	20
3.1.	Potencial de produção de biogás .....	25
3.2.	Crédito de carbono .....	27
3.3.	Programa RenovaBio .....	29
3.4.	Tecnologias para geração de eletricidade .....	32
3.5.	Potencial de produção de energia .....	36
3.6.	Fonte de dados.....	38
4.	METODOLOGIA.....	41
4.1.	Aterro de Cachoeira Paulista – SP .....	41
4.2.	Contexto nacional dos RSU.....	47
4.3.	Matriz energética nacional e o biogás .....	48
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	49
5.1.	Aterro de Cachoeira Paulista – SP .....	49
5.2.	Contexto nacional dos RSU.....	60
5.3.	Matriz energética nacional e o biogás .....	62
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
	REFERÊNCIAS.....	71

## 1. INTRODUÇÃO

A importância do tema está relacionada aos benefícios que a correta disposição final dos RSU pode oferecer. Além de reduzir os danos ambientais relacionados à poluição generalizada e liberação massiva de gases do efeito estufa, possibilita a produção do biogás, um recurso energético que pode ser tratado e comercializado como combustível ou energia elétrica, e a geração de receitas financeiras com a venda de créditos de carbono.

Já o levantamento de informações a respeito do potencial de produção de recursos gerados por este aterro sanitário de Cachoeira Paulista - SP se deve às suas características, tais como: capacidade operacional, região a qual pertence, atendendo as cidades do Vale do Paraíba, inclusive a unidade da Escola de Engenharia de Lorena – USP, além de não contar atualmente com projeto de aproveitamento energético. Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são originados do consumo e descarte da atividade humana, sendo conhecidos popularmente apenas como lixo urbano. A maior concentração das populações em grandes centros, sobretudo em cidades com mais de 200mil habitantes, proporciona uma elevada geração e concentração desses resíduos. Quando dispostos adequadamente em aterros sanitários, toda a matéria orgânica acumulada tem um grande potencial para produção de biogás, rico em gás metano, o qual pode ser usado como fonte de energia. Este aproveitamento reduz os impactos ambientais de sua liberação descontrolada na atmosfera e oferece recursos energéticos e receitas financeiras para a sociedade em geral (NASCIMENTO et al., 2019).

Segundo estimativas da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, o Brasil gerou em 2018 cerca de 79 milhões de toneladas de RSU, dos quais aproximadamente 92% foram coletados. Este levantamento também mostra que em todo o país 29,5 milhões de toneladas de resíduos foram destinados à locais inadequados, como lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2019). O que é bastante preocupante, uma vez que aponta um amplo descumprimento dos municípios brasileiros acerca das diretrizes determinadas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída em agosto de 2010 a partir da aprovação da Lei Federal nº12.305. A legislação vigente orienta práticas sustentáveis de gerenciamento dos RSU, priorizando a não geração, a reciclagem,

assim como a adequada disposição final e o aproveitamento econômico dos subprodutos do lixo, que hoje na maioria das vezes, são considerados apenas como passivos ambientais (BRASIL, 2010).

Tendo em vista a iminente necessidade de adequação dos municípios brasileiros, que em grande parte ainda descartam RSU em situação irregular, causando grandes prejuízos ambientais, é fundamental a elaboração e implantação de mecanismos técnicos e financeiramente atrativos que viabilizem o correto destino para todos esses rejeitos. Sendo assim, uma das principais formas de agregar valor aos resíduos se faz por meio da conversão do biogás em energia, seja pelo tratamento e obtenção do combustível, o biometano, ou pela transformação em energia elétrica. Tais aplicações configuram-se como uma estratégia promissora para geração de riquezas e desenvolvimento limpo, com amplo potencial de crescimento (NASCIMENTO et al., 2019).

Além da demanda pelo saneamento, o Brasil possui outras duas diretrizes. Uma delas determina a diminuição de suas taxas de emissão dos denominados Gases de Efeito Estufa (GEE) até 2030, visando adequação com os parâmetros estabelecidos pelo Acordo Internacional de Paris (BRASIL, 2020). A outra, é uma crescente necessidade por fontes de energia estáveis, descentralizadas e ambientalmente limpas, capazes de garantir a segurança energética nacional (BRASIL; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019). Nesse sentido, a conversão do biogás, um passivo ambiental, em um recurso gerador de riquezas e oportunidades, colabora para a manutenção do desenvolvimento nacional sob diversos aspectos.

O potencial de produção de biogás pode ser calculado a partir da utilização de modelos matemáticos que preveem o volume de gases ao longo do tempo, sobretudo o metano, advindos do processo de decomposição anaeróbica da matéria orgânica presente nos resíduos acumulados nos aterros. As projeções obtidas levam em consideração a quantidade de resíduos e o tempo de deposição, servindo como base para os estudos dos impactos ambientais advindos de sua liberação na atmosfera e potencialidade para o aproveitamento econômico (CARVALHO et al., 2019).

Para o aproveitamento energético, uma das principais rotas de utilização se dá a partir da geração de energia elétrica, com o uso de equipamentos chamados motogeradores. Eles são formados por motores de combustão interna acoplados a

geradores elétricos, que utilizam o combustível resultante do tratamento do biogás para produção de corrente elétrica (TOLMASQUIM, 2016). Essa produção pode abastecer a demanda interna do produtor de energia ou mesmo ser comercializada externamente, gerando receitas financeiras com a venda da energia e dos créditos de carbono associados à redução dos danos ambientais, devido a utilização do gás metano.

### **1.1. Objetivo geral**

Avaliar o potencial energético do aterro sanitário existente na cidade de Cachoeira Paulista - SP.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Identificar os impactos negativos resultantes da inadequada disposição dos Resíduos Sólidos Urbanos, apontando a necessidade de implantação de mais unidades de aterros sanitários no país.
- Avaliar os parâmetros técnicos e estruturais para a captação e tratamento do biogás de aterro e implantação de uma unidade termelétrica associada, contextualizando a aplicação dessa tecnologia.
- Apresentar as características da matriz energética nacional e a participação do biogás como fonte de energia elétrica, de modo a justificar a ampliação de sua capacidade instalada.
- Descrever a política de créditos de carbono vigente no Brasil e as necessidades estruturais do país, que podem impulsionar o desenvolvimento de empreendimentos dessa natureza.
- Dimensionar o potencial de produção de biogás a partir da quantidade de resíduos depositada no aterro de Cachoeira Paulista, e evidenciar seu potencial de geração de energia elétrica e de créditos de descarbonização, no âmbito do programa RenovaBio.

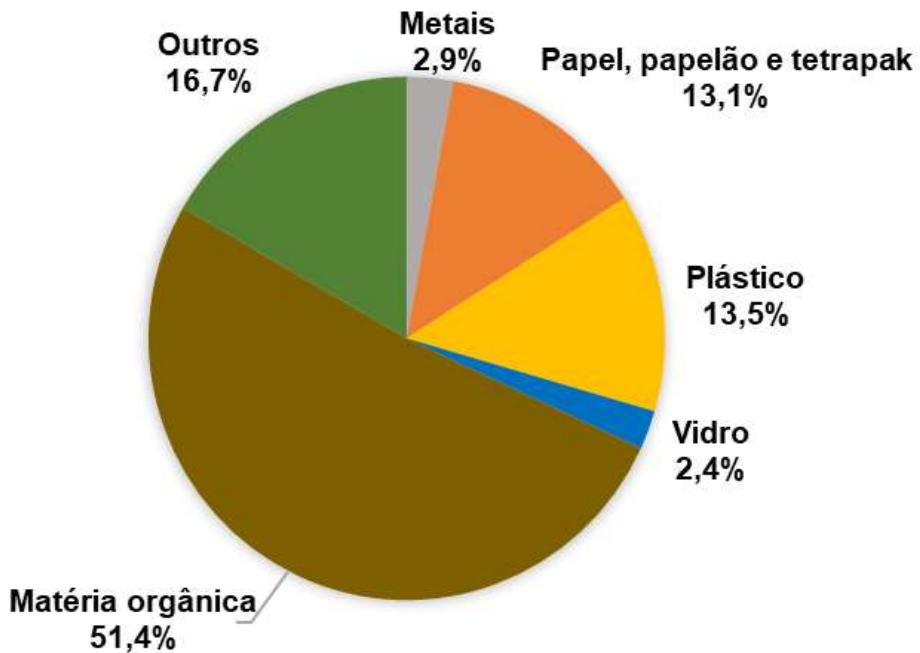
## 2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

São definidos como materiais, substâncias, compostos e objetos em estado sólido ou semissólido, resultantes da atividade humana em todos os seus ramos de atuação, desde o consumo doméstico, processos industriais, atividades agrícolas, hospitalares, de varrição, até mesmo os lodos provenientes do tratamento de água e esgoto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA, 2004).

A Lei Federal nº12.305/2010 classifica os resíduos segundo suas origens e características físico-químicas e biológicas, definindo, entre todos, os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) como sendo aqueles oriundos das atividades de limpeza urbana, dos domicílios, bem como os gerados em estabelecimentos comerciais e dos prestadores de serviço público (BRASIL, 2010).

A Figura 1 apresenta uma estimativa da composição gravimétrica dos RSU coletados no Brasil entre os anos de 1995 e 2008.

Figura 1 - Gráfico da composição dos RSU no Brasil



Fonte: Elaborado pelo Autor com base em INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, 2012

O descarte inadequado de todo e qualquer resíduo de atividade humana implica em inúmeros transtornos de caráter ambiental e sanitário, uma vez que tais dejetos em contato direto com o meio ambiente resultam em contaminação do solo, ar e corpos aquáticos, assim como propiciam a propagação de agentes patológicos e vetores causadores de doenças aos seres humanos, degradando toda a fauna e flora do entorno. Esse problema é maximizado quando a má deposição desses rejeitos acontece em grandes quantidades e por longos períodos, causando prejuízos incalculáveis a partir a poluição da terra, da atmosfera, das águas subterrâneas e o constante risco de acidentes como os incêndios espontâneos (MENDONÇA; ZANG, W.; ZANG, J., 2017).

Como apontado por Marques (2018) o aumento da geração de resíduos a partir da atividade humana de uma população em crescimento, configura uma problemática de fundamental relevância para os agentes administrativos de cidades, estados e grandes organizações sociais como empresas, centros universitários e tantos outros. Nesse contexto, a ineficiência na implantação de procedimentos operacionais adequados para o manejo, reaproveitamento e descarte dos resíduos sólidos configuram um cenário de degradação ambiental, com prejuízos aos recursos naturais e à saúde pública em geral.

Assim, se faz necessário todos os esforços para o correto cumprimento das diretrizes estabelecidas pela PNRS, instituída em agosto de 2010 a partir da aprovação da Lei Federal nº12.305, cujo objetivo foi estabelecer um modelo sustentável de gestão de resíduos, indicando responsabilidade compartilhada, valorizando a inclusão social, a reciclagem e adequada deposição final para os rejeitos (BRASIL, 2010).

A produção de RSU pela população das cidades tende a aumentar com o passar dos anos, uma vez que o perfil de consumo das pessoas tende a gerar maior número de resíduos e a própria população tem uma projeção de crescimento (ABRELPE, 2019). A legislação vigente deixa clara a necessidade de diminuição do acúmulo de rejeitos, massas de materiais que não tem qualquer utilidade. Medidas como a não geração, a redução do uso de bens e produtos descartáveis, a reutilização e a reciclagem devem ser viabilizadas e aplicadas em larga escala.

## 2.1. Locais de disposição final

### Lixões

Os populares lixões são caracterizados como os ambientes onde acontecem a livre descarga de resíduos sem qualquer tratamento, sem controle de contaminação do solo ou mesmo algum nível de proteção do meio ambiente e da saúde pública. Sendo assim, o lixão é a forma mais inadequada de depositar os resíduos provenientes das cidades e do convívio em sociedade. Estabelecidos a partir da falta de conhecimento e muitas vezes falta de interesse público para lidar com a situação, o lixo disposto clandestinamente causa danos diretos e indiretos à saúde, devido a infecção de macro vetores (tais como gatos, cachorros, ratos, urubus e outros animais) e proliferação de micro vetores (como insetos, bactérias, fungos e demais), os quais, cedo ou tarde, acabam entrando em contato com pessoas e transmitindo doenças (MENDONÇA; ZANG, W.; ZANG, J., 2017).

Quanto aos impactos ambientais, podem ser citados os danos causados pelo chorume e pelos gases oriundos da matéria dos resíduos. O chorume é o líquido produzido a partir da decomposição das substâncias contidas nos resíduos sólidos, apresentando coloração escura, mau cheiro e de elevada Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA, 1992). Capaz de infiltrar nas camadas do solo por longos anos e transportar substâncias nocivas em um amplo terreno, causa a contaminação dos lençóis freáticos e da vida vegetal, animal e das pessoas que dele fazem uso, como pode ser observado na ilustração da Figura 2 (POSSAMAI et al., 2007).

Figura 2 - Lixões e suas consequências



Fonte: (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2010)

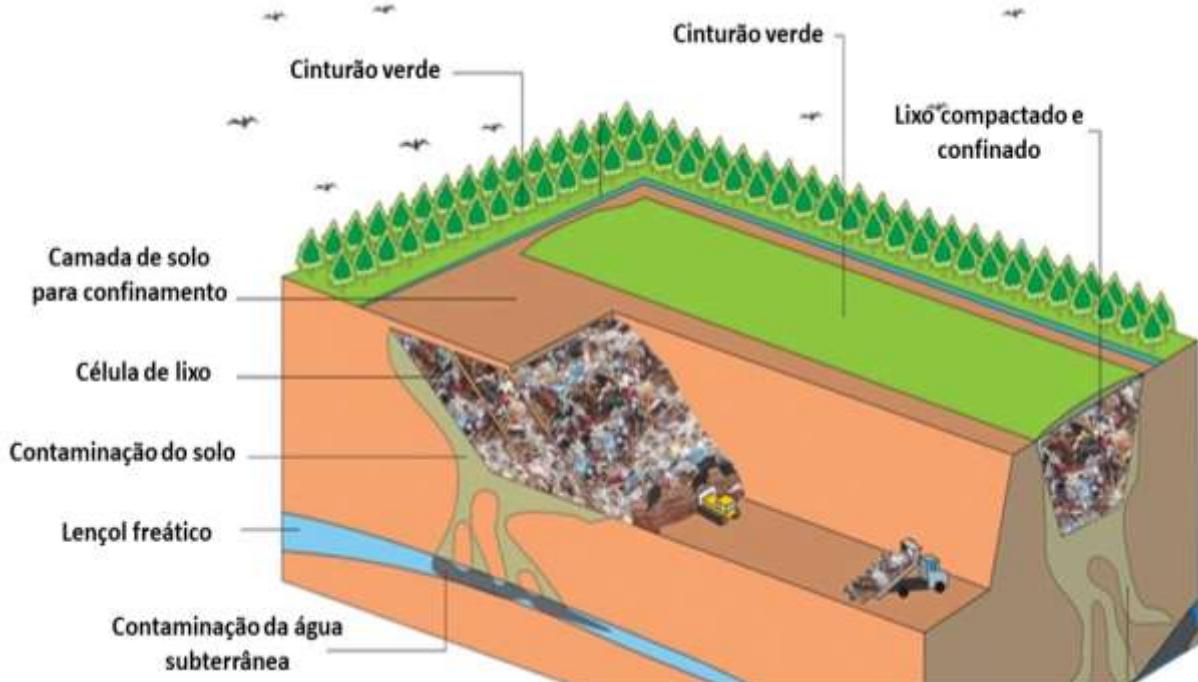
Outro agente perigoso é o gás proveniente da decomposição dessa matéria orgânica, conhecido como gás de aterro, contendo substâncias tóxicas e metano em grande proporção. Isso promove ampla poluição atmosférica, alta periculosidade quanto a ocorrência de explosões e incêndios espontâneos, e massiva liberação dos GEE (POSSAMAI et al., 2007). O metano na atmosfera retém 21 vezes mais calor em relação ao gás carbônico, portanto sua redução tem grande relevância no contexto de preservação do equilíbrio ambiental (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA, 2004).

### Aterro controlado

Outro modo de descarte dos RSU são os Aterros controlados, onde os resíduos são dispostos em situação ligeiramente diferente quando comparados aos lixões a céu aberto. A aplicação dessa técnica não prioriza a padronização do processo, tampouco o cumprimento das normas ambientais brasileiras ou o que recomenda a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Suas consequências estão apresentadas na Figura 3, mostrando resíduos sendo simplesmente enterrados, sem

impermeabilização adequada do solo, ou mesmo sistemas de captação de gases e chorume. Em alguns casos, são adotadas medidas de controle, mas pouco eficientes, como uma impermeabilização parcial do solo, um tratamento básico do chorume e um controle mínimo do acesso na área por pessoas não autorizadas (HISING; GIMENES, 2017).

Figura 3 - Ilustração de um aterro controlado



Fonte: (REGIONAL NEWS, 2014)

Diante do crescimento da população e aumento do valor médio de geração de lixo por pessoa, a produção de resíduos tende a crescer ao longo do tempo. Muitos desses rejeitos não são submetidos a uma triagem prévia, o que diminuiria seu volume final, e continuam sendo descartados em lugares impróprios. O local adequado para a deposição desses materiais deve cumprir uma série de normas e padrões técnicos de segurança ambiental e de salubridade (NBR 8419, 1992).

### Aterro sanitário

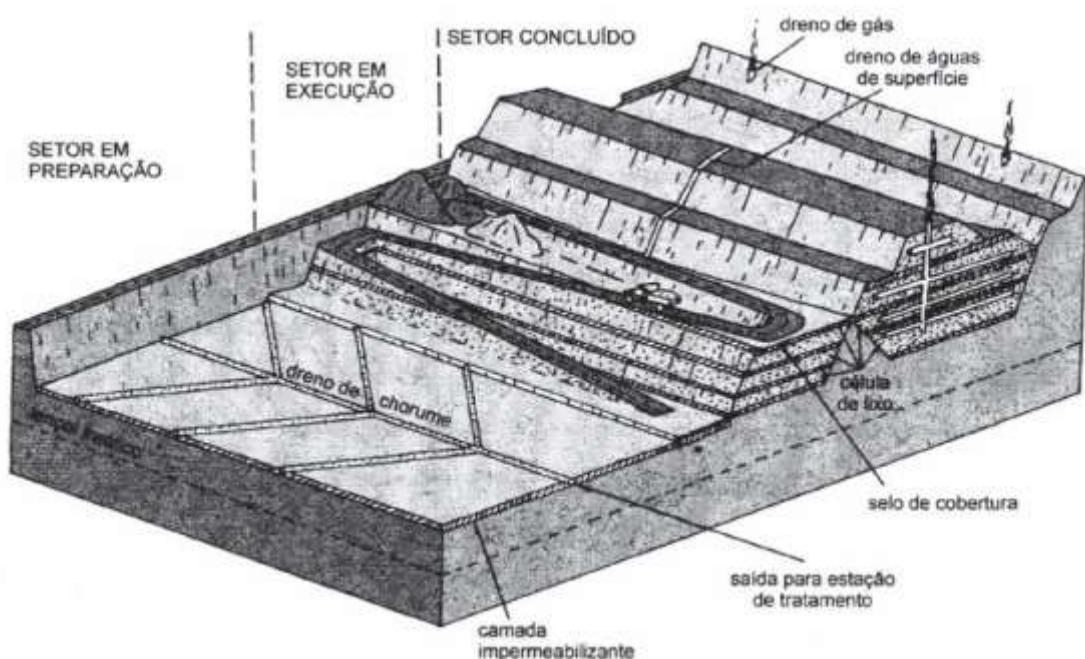
O aterro sanitário é caracterizado como uma obra de engenharia que modifica e prepara o terreno, promovendo a total impermeabilização do solo, e o completo confinamento dos resíduos armazenados. Por isso, é considerado um método de

disposição final mais adequado, capaz de eliminar ou reduzir bastante os impactos ambientais e danos à saúde pública (NBR 8419, 1992).

Um aterro de resíduos sólidos pode ser comparado a um biorreator, cujas principais entradas são os resíduos, ricos em matéria orgânica e água, presentes no próprio material, ou absorvida durante o tempo de exposição ao ambiente, e as principais saídas são o chorume e os gases de aterro, também chamado de biogás de aterro. O que acontece são reações de decomposição da matéria orgânica a partir de processos aeróbicos e sobretudo os anaeróbicos, favorecidos pela diminuição da concentração de oxigênio depois das etapas de compactação e cobertura (PINAS et al., 2016).

A contenção desses perigosos passivos ambientais, possibilita que os subprodutos da degradação da matéria orgânica sejam tratados e reaproveitados, gerando uma importante fonte de renda, principalmente no que diz respeito ao aproveitamento econômico do biogás (NASCIMENTO et al., 2019). A Figura 4 ilustra a evolução das etapas de operação de um aterro sanitário, desde a fase de preparação e impermeabilização do terreno, o período de acúmulo dos dejetos e a finalização com o fechamento de todas as células e monitoramento da estrutura.

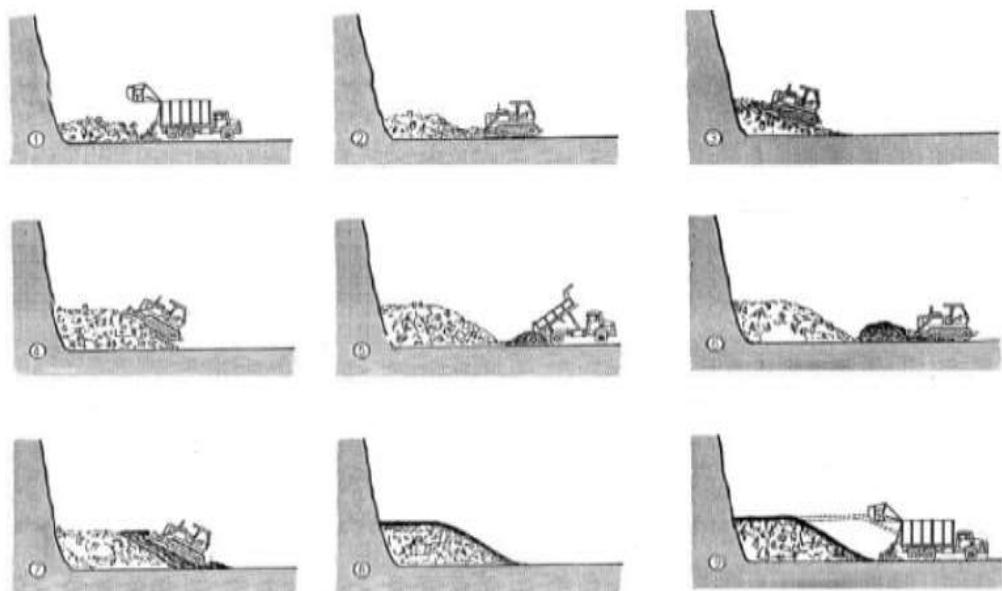
Figura 4 - As diferentes fases de operação de um aterro sanitário



Fonte: (VILHENA), 2018

A compactação e isolamento dos resíduos impossibilita a presença de animais e de pessoas no local, diminuem a emissão de gases para a atmosfera e contribui para a ampliação da vida útil do espaço, garantindo melhor aproveitamento da infraestrutura (OBLADEN, Nicolau; OBLADEN, Neiva; BARROS, 2009). A Figura 5 apresenta uma ilustração do processo de descarga dos resíduos, a compactação e a construção de uma célula de depósito.

Figura 5 - Deposição e compactação de lixo no aterro



Fonte: (OBLADEN, Nicolau; OBLADEN, Neiva; BARROS, 2009)

Esse é um empreendimento que demanda conhecimento técnico especializado, grande estruturação física, aquisição de equipamentos e máquinas, monitoramento por décadas, além de uma gestão integrada entre agentes públicos e privados. Um dos grandes desafios para sua popularização ao longo de todo o país passa pela criação de mecanismos de viabilização econômica dos projetos, os quais possam integrar diferentes cadeias produtivas que fomentem as corretas práticas de manejo e descarte dos Resíduos Sólidos Urbanos (OBLADEN, Nicolau; OBLADEN, Neiva; BARROS, 2009).

### 3. BIOGÁS A PARTIR DO RSU

A matéria orgânica acumulada em ambiente sem oxigênio está sujeita digestão anaeróbica. O processo de decomposição começa em ambiente aeróbico, a partir do momento que a pessoa descarta o resíduo em lixo comum, e continua até que seja feita a compactação e cobertura no aterro. Estima-se que poucos meses depois de coberto seja o suficiente para reduzir a concentração do oxigênio a níveis insignificantes (CARVALHO et al., 2019).

O processo anaeróbio acontece a partir de uma sequência de reações bioquímicas, que degradam a estrutura molecular da matéria orgânica, convertendo grande parte das cadeias de carbono em compostos gasosos, em sua maioria dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ). Também é comum encontrar frações de moléculas como a amônia ( $\text{NH}_3$ ), o hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), o gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e até mesmo o oxigênio ( $\text{O}_2$ ), além de vapor d'água. A concentração percentual de cada composto dependerá do tipo de matéria prima que compõe os resíduos e do tempo de existência do aterro (PIÑAS et al., 2016).

Tomando por base a composição desses gases, nota-se a presença de elementos tóxicos e inflamáveis, cuja liberação descontrolada e sem tratamento para a atmosfera causa uma série de problemas ambientais (MENDONÇA; ZANG, W.; ZANG, J., 2017).

É justamente a alta concentração de gás metano que possibilita a utilização comercial dos gases de aterro. Na maioria das vezes, as concentrações de  $\text{CH}_4$  ficam entre 45 – 60% do total gerado, e a presença de  $\text{CO}_2$  entre 40 – 60%, dependendo das características do resíduo (REGATTIERI, 2009), (ABREU; COSTA FILHO; SOUZA, 2009). A valorização econômica do biogás acontece a partir de um processo de tratamento, no qual o gás metano é separado das outras moléculas existentes, produzindo um combustível conhecido como biometano, com propriedades equivalentes ao gás natural de origem fóssil.

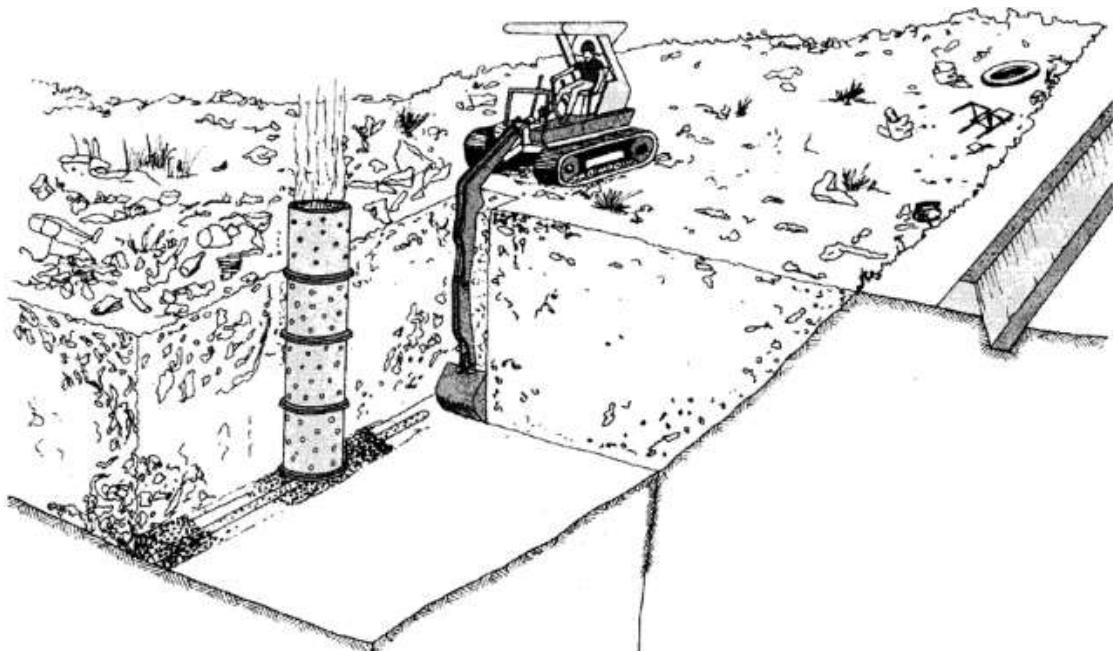
De forma integrada, os sistemas de drenagem interna do aterro objetivam facilitar o escoamento e a captação dos volumes de chorume e de biogás produzidos. Recomenda-se a instalação dos drenos de chorume e de biogás durante as etapas de implantação do projeto, trazendo para o início das obras, os custos de um investimento futuro obrigatório, além de ser mais eficiente, devido sua maior

abrangência no montante de resíduos. Mas também podem ser perfurados em casos necessários, em situações que não foram construídos no período adequado ou quando houve subdimensionamento dos sistemas de drenagem (PINTO, 2019).

O sistema de extração de gases é constituído por uma rede de drenos, horizontais e verticais, tubulações, sopradores, filtros e separadores de condensado. Os drenos em conjunto com os cabeçotes realizam a coleta do biogás no interior do aterro e o entregam para o sistema de coleta ((MACEDO, 2009).

Os drenos são poços de captação que podem ser construídos desde o início da implantação do aterro, ou serem instalados após o fechamento das células. Caso o aterro não tenha feito seu sistema de coleta de gases, ou tenha um sistema subdimensionado, é possível realizar a perfuração e implantação de poços verticais e horizontais (CARVALHO et al., 2019). Na Figura 6 é apresentado um exemplo da instalação de drenos verticais em meio a uma massa de resíduos já depositados.

Figura 6 - Instalação de drenos para chorume e biogás



Fonte: (VILHENA, 2018)

O biogás vindo das tubulações dos poços é direcionado para os chamados pontos de estabilização de fluxo, ou *manifolds*, exibidos pela Figura 7, que entregam essa vazão a uma linha de coleta principal. Nela, o fluxo de extração acontece a partir da ação de sopradores ou sistema de indução de vácuo, que exercem pressão

negativa em todo o sistema de captação, fazendo a sucção dos gases em meio a massa do aterro (MACEDO, 2009).

Figura 7 - Linha de controle do sistema de gases



Fonte: (FERREIRA, 2018)

Chegando à estação de tratamento, caso haja falha em algum processo de utilização do biogás, o volume descartado é direcionado imediatamente um dispositivo chamado *flare*. Este equipamento pode ser usado como ferramenta de segurança cuja função é queimar o excedente de gases em fluxo na unidade. Por outro lado, em aterros onde não é feito o aproveitamento energético, o *flare* funciona como um queimador constante, queimando todos os gases vindos do aterro, e assim minimizando seus impactos na atmosfera (MACEDO, 2009).

O objetivo do processo de tratamento do biogás é elevar a concentração de metano para níveis acima de 90% na mistura, potencializando seu poder calorífero. Para isso, são removidos os gases considerados contaminantes como o CO<sub>2</sub>, o NH<sub>3</sub>, o H<sub>2</sub>S, o CO, e compostos como os siloxinos e hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos. Essas substâncias são causadores de uma série de problemas, como o aumento nas emissões de poluentes, a diminuição da vida útil dos equipamentos e baixa eficiência energética (CARVALHO et al., 2019).

Inicialmente é feita a redução do nível de umidade e remoção de aglomerados em forma de espuma, que se concentram nos separadores de condensado, instalados ao longo das tubulações vindas do aterro. Ao chegar na unidade de processamento, é realizada a filtragem do particulado e a remoção profunda dos líquidos nos desumidificadores (MACEDO, 2009).

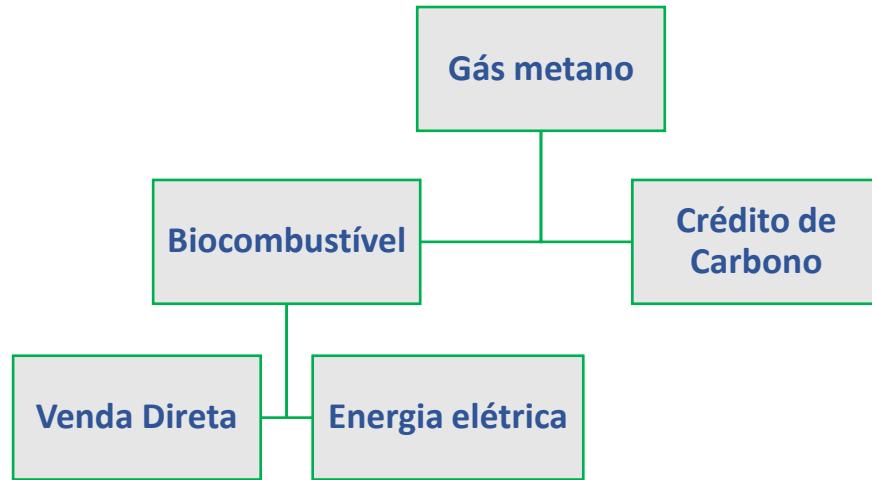
A sequência de tratamento utiliza as especificidades das diferentes moléculas para purificar o gás. São usados equipamentos como lavadores à água ou polietilenoglicol, assim como técnicas de filtragem por membranas, carvão ativado e adsorção por aplicação de pressão, implantação de reações de absorção química, além de técnicas de separação de moléculas pelo ponto de condensação fazendo uso da criogenia. Este último é um método mais caro, porém pode ser mais vantajoso em situações de grande volume de processamento e quando é exigido alto grau de pureza do gás resultante, também demonstra bastante versatilidade, além de entregar uma redução de cerca de 50% na presença de siloxanos (CARVALHO et al., 2019). Depois de passar pela estação de tratamento, o biogás é convertido em biometano, que pode ser comercializado como combustível ou mesmo ser usado para geração de energia elétrica.

O sistema de tratamento em operação em uma usina do Rio Grande do Sul consegue disponibilizar 50% do volume total de gases coletados como combustível para o sistema interno de geração elétrica a partir de motogeradores. No início o biogás recebe um tratamento térmico e químico, com a redução da temperatura em contato com a água e etilenoglicol, provocando a remoção da umidade, sendo posteriormente encaminhado a um filtro de carvão ativado para remoção de contaminantes. Esse sistema com o carvão apresentou rápida saturação e por isso será substituído por outro método mais eficiente e contínuo (CARDOSO; SOUZA; SILVA, 2019).

Em resumo, todos os métodos devem ser analisados em função das características do biogás coletado e dos padrões exigidos para o combustível, além da relação custo-benefício entre os valores pagos com as instalações de purificação e dos custos com as manutenções dos equipamentos (CARVALHO et al., 2019). O aproveitamento econômico do biogás, sobretudo de sua parcela de metano, pode acontecer por meio da venda da energia elétrica e do biocombustível com alta pureza,

além da emissão e comercialização de créditos de carbono, ou uma de suas variantes, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Possíveis aproveitamentos econômicos do uso do biogás de aterro



Fonte: Elaborado pelo Autor

Em 2016, entrou em operação um importante projeto situado no município de Caieiras – SP, a termoelétrica Termoverde Caieiras, mostrada na Figura 9 com destaque para a divisão de suas estruturas operacionais. A unidade recebeu um investimento da ordem de R\$110 milhões, dispondo de uma potência instalada de 29,5 MW. A energia gerada é uma importante fonte de recursos que abastece a região metropolitana de São Paulo (THEOTONIO, 2019).

Figura 9 - Vista aérea Termoverde Caieiras



Fonte: (THEOTONIO, 2019)

### 3.1. Potencial de produção de biogás

Visando oferecer estimativas preliminares para a produção de gases resultantes dos processos bioquímicos da decomposição da matéria orgânica confinada em aterros sanitários, foram elaborados modelos matemáticos baseados na conservação de massa em sistemas fechados. Essas ferramentas são importantes pois indicam a quantidade de gases produzidos e o tempo de liberação que um determinado montante de resíduos depositado pode oferecer. Isso possibilita que as autoridades façam uma estimativa dos impactos ambientais, além de ajudar na tomada de decisão inicial sobre a implantação de um projeto de captação e aproveitamento do biogás (CARVALHO et al., 2019).

As projeções, feitas em sua grande maioria por modelos de primeira ordem, pressupõem que a produção dos gases decaia exponencialmente ao longo do tempo. É previsto que a geração de metano e outros gases aumente enquanto o aterro está em operação, devido ao acúmulo de crescentes quantidades de matéria orgânica até o período final das atividades do aterro. Não havendo inserção de resíduos, espera-se que aconteça um declínio exponencial na produção de biogás (CARVALHO et al., 2019).

Em trabalho desenvolvido por Piñas, et al (2016) foi feito um comparativo entre dois modelos matemáticos de decaimento de primeira ordem para previsão de produção de gases de aterro. Foram analisados os modelos *Landfill Gas Emissions Model* (LandGEM) e o Biogás, os quais mostram-se equivalentes em suas estimativas quanto à produção de metano. Na comparação, os métodos apresentados forneceram valores muito próximos um do outro, com uma diferença de apenas 5% entre as estimativas, além de apresentarem o mesmo comportamento gráfico.

O LandGEM é um modelo internacionalmente conhecido, desenvolvido pela *US Environmental Protection Agency* (EPA), a agência federal de proteção ambiental do governo dos EUA, encarregada de proteger a saúde humana e o meio ambiente (CARVALHO et al., 2019).

O modelo de geração “Biogás” foi elaborado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) a partir de uma parceria entre a Secretaria de Estado do Meio Ambiente de São Paulo e o Governo Federal. O software Biogás Geração e Uso Energético realiza a estimativa dos valores de produção de metano em aterros

sanitários e estações de tratamento anaeróbico de efluentes, assim como oferece uma previsão quanto aos equipamentos necessários para a construção de uma infraestrutura adequada visando o aproveitamento desse gás (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2006).

Devido maior simplicidade na execução e validade reconhecida pelo órgão ambiental responsável, este trabalho fará uso da equação aplicada no modelo desenvolvido pela CETESB em seu software de estimativas. Como mencionado, este modelo descreve uma crescente produção de gases, proporcionada pelo volume crescente de material depositado até o último ano de funcionamento do aterro, havendo posteriormente uma diminuição constante em ritmo exponencial.

O modelo de geração “Biogás” traz as Equações (1), (2) e (3) (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2006):

$$\sum Q_x = kL_0 \sum (R_T e^{-k(x-T)}) \quad (1)$$

$$\int \frac{dQ}{dt} = kR_T L_0 \quad (2)$$

$$Q_x = kR_T L_0 e^{-k(x-T)} \quad (3)$$

Considerando:

$Q_x$  → a vazão exclusiva de metano no período analisado, unidade dada por ( $m^3/ano$ ).

$k$  → denominada constante de decaimento, com unidade ( $1/ano$ ).

$L_0$  → é o potencial de geração de biogás ( $m^3/kg$ ).

$x$  → ano atual da análise, o ano desejado para a estimativa.

$T$  → ano de deposição do resíduo, ou seja, o ano de entrada do resíduo no aterro.

$R_T$  → entrada de resíduos no ano T ( $t/ano$ ).

A problemática dessa metodologia está na importância e dificuldade de se fazer estimativas adequadas para os valores das constantes  $k$  e  $L_0$ . Normalmente esses

valores são tabelados de acordo com as características de consumo de uma dada população, a distribuição das frações do lixo, se tem mais ou menos matéria orgânica, o regime de chuvas na região do aterro, e as características do manejo empregado. Sendo  $k$  a taxa de geração de gases e  $L_o$  a quantidade potencial de gases gerados, seus valores são considerados conforme Tabela 1 (ABRELPE, 2013).

Tabela 1- Faixas dos valores  $L_o$  e  $k$

<b>Variável</b>	<b>Faixa</b>	<b>Valores sugeridos</b>		
		<b>Clima úmido</b>	<b>Clima de umidade média</b>	<b>Clima seco</b>
$L_o$ (m <sup>3</sup> /t)	0 - 187	62 - 140	62 - 140	47 - 125
$k$ (1/ano)	0,003 - 0,3	0,05 - 2,0	0,03 - 0,10	0,01 - 0,05

Fonte: (ABRELPE, 2013)

Em projetos que exigem maior confiabilidade das informações para tomada de decisão, como em uma análise pré-implantação de projeto, é importante reduzir ao máximo o grau de incerteza desses parâmetros e assim criar uma estimativa mais precisa e confiável de quanto gás será produzido. Isso pode ser feito se o modelo for calibrado periodicamente com dados reais de fluxo, coletados de um sistema de monitoramento abrangente (ABRELPE, 2013).

Outra importante variável é a taxa de captação efetiva dos gases, que pode estar sendo impactada devido a permeabilidade da camada de cobertura do aterro, dificuldades operacionais, irregularidades no manejo e depósito dos resíduos. Assim, o fator de captação deve ser sempre menor do que 1, e representa a ineficiência do sistema de captação, o que diminui a oferta útil de gases, sendo comum que esses valores fiquem entre 60 – 80% (CANDIANI; VIANA, 2018).

### 3.2. Crédito de carbono

Em meio a 21<sup>a</sup> Conferência das Partes (COP21) da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC, sigla em inglês), reunião popularmente conhecida como Acordo de Paris, foi firmado pelos 195 países membros um compromisso para redução da emissão dos chamados GEE com o

objetivo de minimizar o avanço das mudanças climáticas, sobretudo aquelas associadas aos impactos da atividade humana. Nesse contexto, os países tiveram liberdade para traçar seus próprios compromissos e planejamentos, seguindo métricas ajustadas a realidade social e econômica locais. O mecanismo ficou conhecido como as Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas (INDC, na sigla em inglês). O Brasil entregou seu documento à Organização das Nações Unidas (ONU) em 21 de setembro de 2016, e desde então passou a ter um compromisso oficial, chamado de Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) , para redução dos GEE (BRASIL, 2020).

Para atingir suas metas ambiciosas, o país precisará reduzir as emissões de GEE, a níveis próximos de 40% do que foram as emissões em 2005, até o ano de 2030. Nesse sentido, as principais estratégias em operação é aumentar a participação de fontes de energia renovável na matriz energética nacional e restaurar grandes extensões territoriais de floresta degradada. Esse desafio se intensifica em meio a um cenário de crescente pressão sobre os recursos naturais, devido ao aumento contínuo da população e a necessidade de expansão do PIB, o que exige ainda mais a organização de uma política econômica sustentável (BRASIL, 2020).

Com o objetivo de impulsionar a redução dos GEE e fomentar o desenvolvimento e a implantação de tecnologias mais eficientes e sustentáveis, os governos e as empresas têm à disposição alguns mecanismos, entre eles o Mercado de Créditos de Carbono. Essa estratégia, segue métricas estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto em 2005, no qual, uma tonelada de CO<sub>2</sub> é transformada em um crédito de carbono. Nesse contexto, as organizações integrantes possuem cotas individuais de emissões. Ficando abaixo do estabelecido, essas cotas podem ser convertidas em moeda de troca com aquelas empresas que ultrapassaram suas metas e precisarão “limpar” suas emissões (FULLER, 2020).

Estima-se que apenas 25% das emissões globais de GEE estão sujeitas a um sistema regulado de precificação de carbono. A ampliação desse cenário, em um Mercado de Créditos de Carbono global, as empresas e os setores da economia podem comercializar seus direitos de emissão, indo além das questões ambientais, promovendo a movimentando recursos financeiros e a competitividade internacional entre as instituições (WORLD BANK GROUP, 2019) (FULLER, 2020).

No Brasil está em estudo formas de precificação das emissões de carbono. Uma delas seria realizada a partir da cobrança de um imposto sobre às atividades econômicas mais poluentes, e o outro seria por meio da formação de um mercado de direitos de emissão de carbono, para que as empresas comercializem suas cotas excedentes e deficitárias. Uma das principais dificuldades encontradas é a aplicação de uma metodologia nacional de medição e o registro coerente das emissões, assim como a definição de instrumentos legais para as futuras negociações (DURÃO; NEDER, 2020).

A proposta de comercialização de créditos de carbono é a que tem se apresentado mais viável ao país, e tem ganhado apoio do Ministério da Economia, podendo proporcionar maior dinamismo, transparência e segurança entre os agentes, assim como maior participação da sociedade civil e do empresariado (DURÃO; NEDER, 2020).

Mesmo não havendo ainda um mercado ampla de créditos de carbono no Brasil, algumas companhias têm contabilizado suas emissões e priorizado investimentos em projetos sustentáveis, reduzindo suas emissões e melhorando a eficiência energética. Essas organizações têm se preparado para um cenário de crescimento da demanda por produtos e serviços de baixo carbono, o que favorece a integração da sustentabilidade nos modelos de negócios. (FULLER, 2020).

Em linha com as diretrizes dos Mercados de Carbono, é importante ressaltar a iniciativa do Ministério de Minas e Energia, que desde dezembro de 2016, vem implementando um programa nacional para o setor de combustíveis. O titulado RenovaBio tem como objetivo contribuir para o fortalecimento da sustentabilidade do setor frente aos novos desafios técnicos e econômicos, sobretudo no que se refere à expansão e segurança da oferta de insumos energéticos, e redução dos níveis de poluição e gases de efeito estufa pelo setor (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2017).

### **3.3. Programa RenovaBio**

Instituída a partir da Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, a Política Nacional de Biocombustíveis, denominada RenovaBio, tem como objetivos principais a expansão da produção e utilização de biocombustíveis na matriz energética

nacional, promover uma adequada relação entre eficiência energética e redução das emissões dos gases causadores do efeito estufa em todo o ciclo de produção e consumo de combustíveis, e com isso contribuir para que o Brasil atenda seus compromissos firmados na COP21. São caracterizados como biocombustíveis o etanol de cana-de-açúcar, o etanol de milho, o biodiesel, o bioquerosene de aviação e o biogás/biometano (BRASIL, 2017).

Seguindo diretrizes internacionais de projetos vigentes nos Estados Unidos e na União Europeia, o Programa RenovaBio estabelece uma proposta regulatória de promoção dos biocombustíveis no país. Sua metodologia está baseada na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do combustível, uma ferramenta que dimensiona os impactos ambientais durante todo o ciclo de vida do produto. Nos cálculos, são levados em consideração parâmetros como o rendimento industrial, o consumo de material e energia durante os processos de produção, armazenamento e transporte, o consumo de fertilizantes no campo e o rendimento de energia excedente. Essas considerações estabelecem uma relação das emissões de gases causadores de efeito estufa por unidade de energia, que representa a quantidade de carbono equivalente do combustível analisado (DELGADO; SOUSA; ROITMAN, 2017).

A partir da contabilização dos índices de emissão de carbono, os produtores ou importadores de biocombustíveis, devidamente autorizados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP) e integrados no RenovaBio, recebem uma nota de eficiência enérgico-ambiental, a qual é aplicada sobre o volume de biocombustível comercializado. Essa somatória gera um dos principais instrumentos de ação desse programa, são os chamados Créditos de Descarbonização (ou CBIO). Cada unidade de CBIO representa uma tonelada de gás carbônico equivalente ( $1\ ton_{CO_2eq.}$ ). Com isso, os produtores de CBIOs podem vender seus créditos para as distribuidoras de combustível que são obrigadas a comprá-los para reduzirem suas parcelas de emissão de GEE (UNICA, 2020) .

A implantação desse programa apresenta um grande potencial de benefícios à cadeia produtiva, uma vez que reconhece a capacidade que cada combustível tem para contribuir com a descarbonização do setor, promove previsibilidade e garantia da oferta de biocombustíveis, assim como impulsiona ganhos de eficiência energética em sua produção e consumo (DELGADO; SOUSA; ROITMAN, 2017).

Desde que entrou em vigor, em abril de 2020, momento em que as distribuidoras de combustível passaram a adquirir os créditos de descarbonização, até o início do mês de novembro, foram emitidos um total de aproximadamente 14 milhões de CBIOs, o equivalente a 95% da meta anual descarbonização do setor, indicando que 2020 foi um bom ano de estreia para o programa (UNICA, 2020).

A partir das Resoluções ANP nº 8/2015 e ANP nº 685/2017 a agência regulamentou a produção e comercialização do biometano oriundo, respectivamente, de resíduos agrossilvopastoris e de resíduos sólidos urbanos ou resíduos de esgotamento sanitário. As exigências operacionais visam garantir a qualidade e pureza do biocombustível gerado, bem como a segurança nos processos de armazenamento e transporte. Em se tratando de uso para geração de energia elétrica, o produtor de biometano fica dispensado quanto às obrigações do controle de qualidade junto a agência reguladora (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEL, 2015) (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEL, 2017).

Segundo Resolução nº 758, de 23 de novembro de 2018, publicada no Diário Oficial da União, unidades produtoras podem incluir além da produção do biocombustível, a geração de energia elétrica e aterro sanitário. Nesse sentido, em tais condições uma planta geradora de energia elétrica a partir de biogás/biometano de aterro sanitário está apta a pedir seu certificado de produtor de CBIOs junto a ANP (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEL, 2018).

Ao estabelecer parâmetros de emissão para cada combustível, a obtenção das toneladas equivalentes é feita a partir da subtração das quantidades calculadas entre dois combustíveis diferentes. Por exemplo, a venda de CBios advindas da produção de álcool de cana de açúcar será contabilizada em relação às emissões de um outro combustível, que normalmente é uma média entre gasolina e diesel. Esses créditos negociados têm o objetivo de estimular a produção e comercialização de combustíveis renováveis, ampliando sua presença na matriz energética nacional (DURÃO; NEDER, 2020).

As emissões de carbono equivalente expressam a quantidade em massa de CO<sub>2</sub> liberada pelo uso de um combustível. Esse valor é estimado considerando suas características e as emissões de CO<sub>2</sub> ao longo da cadeia de produção. Visando corrigir

eventuais erros no levantamento de dados e ineficiências nos processos envolvidos, é usado um fator de correção, conhecido como Volume Elegível. Trata-se de um percentual que quando multiplicado pelo volume total de carbono equivalente, reduz o volume considerado para as somas dos CBios (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEL, 2020).

Para contabilizar a intensidade de carbono que será trocada entre as partes, por exemplo entre o produtor de biocombustível e uma distribuidora, é feita a comparação entre as intensidades de carbono dos combustíveis envolvidos na negociação. A diferença entre esses valores é chamada de Nota de Eficiência, que expressa o saldo da intensidade de carbono que será aplicado à quantidade de combustível trocado (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEL, 2020).

É importante deixar claro que o biocombustível considerado nos cálculos a seguir não é o mesmo advindo de aterros sanitários, que na realidade apresentará um outro valor, podendo até mesmo ser negativo. Isso se deve ao fato de que se trata do aproveitamento de um passivo ambiental previamente existente. Portanto, as estimativas de retorno levantadas estão pautadas em um contexto conservador.

### **3.4. Tecnologias para geração de eletricidade**

Para a produção da energia elétrica a partir dos gases de aterro, é realizado um processo de combustão do biogás ou biometano, que transforma a energia química do combustível em trabalho, capaz de acionar o eixo de um gerador de corrente elétrica. As principais tecnologias disponíveis para essa função são as turbinas a gás, as microturbinas e os motores de combustão interna (ARAÚJO; FEROLDI; URIO, 2014).

#### **Turbina e microturbina a gás**

As turbinas a gás são máquinas térmicas que podem funcionar tanto em sistemas de baixa eficiência, a partir da combustão direta e liberação dos gases de exaustão, tanto quanto em conjuntos mais complexos, com ciclos combinados, elevadas taxas de eficiência e aproveitamento dos gases (MOREIRA, 2017).

Resumidamente, as turbinas a gás operam um processo conhecido como Ciclo Brayton, no qual um compressor despeja uma porção de ar em alta pressão (por volta de 101,3 MPa) dentro de uma câmara de combustão, local onde o combustível é injetado. Esta câmara se mantém em pressão e temperaturas constantes, assim, a energia da expansão dos gases mantém a alta temperatura do sistema e faz mover as pás da turbina. O movimento no eixo é transferido para um gerador elétrico e para o próprio compressor, ou seja, o trabalho convertido pelas pás é dividido e usado uma parte para o funcionamento do sistema, e a outra parte para a produção de energia elétrica (BAGGIO, 2017).

Esse sistema de combustão permite a ampliação das taxas de eficiência ao fazer uso de ciclos combinados que reaproveitam frações de energia que estavam sendo perdidas. Os sistemas combinados são estabelecidos a partir de um conjunto de turbinas, normalmente uma turbina a gás acoplada a uma turbina a vapor, máquinas térmicas que funcionam segundo Ciclo Brayton e Rankine. Com os sistemas integrados, o calor contido nos gases de exaustão da turbina a gás de alta pressão, fornece energia para aquecimento da água de evaporação da turbina a vapor, alimentando mais um sistema de geração de energia (BAGGIO, 2017).

Em suma, a instalação de sistemas dessa natureza, tem como objetivo ampliar a eficiência energética para valores que seriam impossíveis a partir de ciclos simples, podendo atingir níveis de rendimento acima de 60%. Contudo, a viabilidade da implantação de equipamentos dessa natureza está condicionada ao investimento financeiro disponível, a oferta de combustível, aos custos operacionais e à mão de obra qualificada para manutenção (TOLMASQUIM, 2016).

Por outro lado, quando a oferta de combustível é pequena as microturbinas a gás são uma boa opção para o aproveitamento energético. Seu funcionamento segue as etapas de operação das turbinas a gás de maior porte, ou seja, estão estabelecidas conforme o Ciclo Brayton, com presença de compressor para admissão de ar em alta pressão, variando entre 3,5 e 8,5 Bar, queima da mistura ar-combustível na câmara de combustão, e expansão dos gases em alta temperatura e pressão nas pás da turbina. As peculiaridades observadas nessas turbinas de pequeno porte dizem respeito sobretudo as técnicas de reaproveitamento do calor e produção de energia elétrica integrada diretamente ao eixo da turbina (BAGGIO, 2017).

Nesses sistemas, a maior eficiência energética pode ser alcançada a partir do reaproveitamento do calor dos gases de exaustão, em temperaturas que variam entre 454 e 594°C, para preaquecer o ar na saída do compressor e entrada na câmara de combustão. Quanto ao sistema gerador, um gerador de alta frequência é instalado junto ao eixo da turbina, produzindo energia elétrica em frequências da ordem de 1.600 Hz. Podem ser usados geradores síncronos de imã permanente, bem como geradores de corrente contínua ou de indução, integrados a um retificador e inversor, responsáveis por ajustar a tensão e frequência elétrica para os níveis comumente usados pelas redes de distribuição (BONA; RUPPERT FILHO, 2004).

As vantagens desse modo de geração de energia se dão pela possibilidade de operação de combustível pobre em metano e rico em impurezas, sem grandes prejuízos à integridade física das peças, bom rendimento energético, dimensões reduzidas, menor peso do sistema e simplicidade na instalação (HIRANO, 2015).

### **Motores a Combustão Interna – MCI**

Outra linha de equipamento são os motores a combustão interna, equivalentes aqueles usados em carros e caminhões, sendo caracterizados como máquinas térmicas que operam segundo o Ciclo Otto ou Ciclo Diesel. Essas técnicas apresentam características semelhantes no seu modo de funcionamento (ARAÚJO; FEROLDI; URIO, 2014).

Um motor do tipo Otto realiza um ciclo completo em quatro tempos. No primeiro momento, acontece a admissão da mistura de ar e combustível, em seguida a compressão, depois a ignição induzida por centelha, finalizando com a exaustão dos gases gerados (ARAÚJO; FEROLDI; URIO, 2014).

Os motores do Ciclo Diesel podem operar com ciclos de quatro tempos. Seu funcionamento inicia com uma alta pressurização de ar dentro da câmara, gerando aumento de temperatura, com isso, quando o combustível é injetado, a mistura sofre combustão espontânea e explode, empurrando o pistão (MELO, 2014).

Algumas diferenças importantes entre essas tecnologias são as maiores taxas de compressão exigidas para o Ciclo Diesel, assim como uma maior emissão de compostos NOx e particulados em meio aos gases de exaustão. Nesse sentido, para as aplicações do biometano tem sido mais comum a escolha pelos motores do Ciclo

Otto, por proporcionarem um controle mais preciso das condições de pressão, eficiência e emissão de poluentes (ARAÚJO; FEROLDI; URIO, 2014).

Existe no mercado uma linha de equipamentos integrados, como o apresentado na Figura 10, capazes de consumir combustível e gerar energia elétrica, são os chamados conjuntos motogeradores, construídos a partir da integração entre um motor de combustão interna e um gerador elétrico. Nessas aplicações era mais comum o uso de motores do tipo Ciclo Diesel, contudo, devido as preocupações quanto as emissões de NOx e particulados, os países industrializados estão ampliando o uso de motores do Ciclo Otto (TOLMASQUIM, 2016).

Figura 10 - Conjunto Motogerador do tipo MCI



Fonte: (INDIAMART, 2020)

Por ser um motor capaz de operar com uma ampla linha de combustíveis, tais como etanol biogás, gás natural e gasolina, sua utilização vem crescendo e ganhando destaque. Motores dessa natureza apresentam eficiência elétrica da ordem de 29,7% para equipamentos de menor porte, como os de 100kW e aproximadamente 37% para máquinas de grande porte, como as de 5MW de potência (TOLMASQUIM, 2016).

Nesse sentido, a grande maioria dos projetos de aterros sanitários no Brasil tem se utilizado de motores de combustão interna, operando a partir do Ciclo Otto de

quatro tempos. Isso se deve sobretudo a sua versatilidade de potências, satisfatórios valores de eficiência energética, estando entre 25% e 35%, simplicidade na instalação, facilidade de operar em paralelo para ampliação da capacidade de produção e custos atrativos de aquisição e manutenção (CARVALHO et al., 2019).

Uma unidade produtora de energia elétrica que tem como objetivo a venda de energia para o mercado consumidor externo, precisa estar conectada à rede de distribuição mais próxima, respeitando todos os padrões operacionais estabelecidos para esta determinada linha de transmissão. Para tanto, é necessária a instalação de uma central de gerenciamento elétrico, denominada subestação, capaz de adequar as características da corrente elétrica produzida pelos grupos geradores com as características da rede de distribuição, assim como garantir a segurança do sistema, em situações de irregularidades operacionais (MUZY, 2012).

Conforme descrito por Muzy (2012) as subestações são classificadas a partir de diversos critérios, tais como: o nível de tensão e a relação entre os níveis de tensão de entrada e de saída, sua função em relação ao sistema elétrico global, o tipo de instalação, e o tipo de comando.

Para o perfil de energia elétrica gerada nas usinas apresentadas, são empregadas unidades de subestação elevadora, capazes de operar de forma totalmente automatizada, estando instaladas ao ar livre ou em ambiente fechado. São responsáveis por filtrar interferências e adequar os níveis de tensão da energia produzida com as características da tensão da rede de distribuição, entregando normalmente, a energia em faixas de média tensão, com linhas típicas de 13,8kV e 34,5kV (MUZY, 2012).

### **3.5. Potencial de produção de energia**

A produção de energia elétrica é feita a partir da combustão do biogás ou biometano em máquinas térmicas para o acionamento de geradores elétricos. A equação que calcula o potencial energético disponível relaciona a vazão, o poder calorífico do combustível e tempo de disponibilidade.

A equação, usada no programa Biogás Geração e Uso Energético considera um período anual para os cálculos (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2006).

$$P_x = \frac{Q_x P_{c(CH_4)}}{T} E_c \quad (4)$$

Onde:

$P_x$  → potência disponível a cada ano [W];

$Q_x$  → vazão de  $CH_4$  produzido [ $m_{CH_4}^3/ano$ ];

$P_{c(CH_4)}$  → poder calorífico do metano [ $J/m_{CH_4}^3$ ];

$E_c$  → eficiência na coleta dos gases [%];

$T$  → período de vazão [ano].

Sendo:

$P_{c(CH_4)}$  →  $35,53 \cdot 10^6 [J/m_{CH_4}^3]$ ;

$T = 1\ anno$ ;

$1\ anno = 365\ [dias] \times [24\ horas] \times [3600\ segundos]$ ;

$T = 31.536.000\ s\ [s/ano]$ ;

$1\ [W] = 1\ [J/s]$ ;

$E_c$  → variável de acordo com manejo do aterro.

Depois de encontrada a potência disponível é preciso ajustar essa estimativa para um cenário mais próximo da potência real dos geradores. No Brasil, a principal tecnologia empregada são os conjuntos motogeradores que usam um Motor de Combustão Interna (MCI) acoplado a um gerador, apresentando em torno de 33% de eficiência. Por ser a técnica mais usada no país, conta com ampla oferta de produtos no mercado interno, diversas opções de potência e maior facilidade na execução de manutenções.

A equação que entrega a Potência Gerada faz apenas a multiplicação da Potência Disponível pelo fator de eficiência, como segue abaixo (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2006):

$$P_{Gerada} = P_x E_M \quad (5)$$

Onde:

$P_{Gerada}$  → potência gerada a cada ano [W];

$P_x$  → potência disponível a cada ano [W];

$E_M$  → eficiência do motogerador [%].

A conversão da potência em energia é feita considerando o despacho de uma determinada potência ao longo de um dado período, ou seja, energia é igual a potência multiplicada pelo tempo.

Em se tratando do setor elétrico, a principal unidade de medida de energia é o  $Wh$  (watt-hora) e suas variações  $kWh = 1.000 Wh$  e  $MWh = 1.000.000 Wh$ . Com isso, a energia produzida ou consumida deve ser calculada a partir da multiplicação da potência, expressa em  $W$  (*Watt*),  $kW$  (*kiloWatt*) ou  $MW$  (*MegaWatt*) pelo tempo em horas, de produção ou de consumo.

Para se calcular o montante de energia no período de 1 ano, o tempo considerado será o seu equivalente em número de horas, como expresso a seguir:

$$Energia_{anual} = Potência * Tempo \quad (6)$$

$$Energia_{anual} = 1 [W] * 1 [ano]$$

$$Energia_{anual} = 1 [W] * (24 [h] * 365 (dias))$$

$$Energia_{anual} = 8760 [Wh]$$

Portanto, para definir a quantidade de energia anual associada a uma potência, basta multiplicar a potência expressa em  $W$  (*Watt*) por 8760, que representa o número total de horas em 1 ano.

### 3.6. Fonte de dados

A ABRELPE foi fundada em 1976 e é atualmente representante da *International Solid Waste Association* no Brasil, além de sede da Secretaria Regional para a América do Sul da Parceria Internacional para Desenvolvimento da Gestão de Resíduos junto a Autoridades Locais (ABRELPE, 2021). Seus relatórios anuais sobre

o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil trazem os dados gerais em todo o país sobre a produção, coleta e disposição final dos resíduos sólidos, sendo referência para trabalhos acadêmicos, elaboração de políticas públicas e promoção da educação ambiental em diversos aspectos.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) é uma instituição pública federal, criada e efetivada pelo Congresso Nacional em 2004, por meio da Lei 10.847, tendo como objetivo cumprir o dever do Estado nacional de promover o desenvolvimento sustentável da infraestrutura energética do país. Nesse sentido, presta serviços ao Ministério de Minas e Energia na área de estudos e pesquisas destinados ao planejamento do setor energético, incluindo energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados e biocombustíveis. A partir de publicações anuais intituladas Balanço Energético Nacional (BEN) são divulgadas diversas informações referentes à oferta e consumo de energia no país, bem como as atividades de extração de recursos primários, transformação em formas secundárias, distribuição e uso de energia, servindo de base para o planejamento energético nacional (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2004).

A CETESB é agência responsável pelas ações de controle, licenciamento, fiscalização e monitoramento das atividades potencialmente poluidoras. Sua atividade está voltada para a promoção, proteção e a recuperação da qualidade do ar, das águas e do solo (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2020). Nos documentos disponibilizados, a instituição organiza os dados sobre a quantidade média de resíduos gerados diariamente pelas cidades do estado de São Paulo, pontuando e classificando os locais de disposição. Com base nas tabelas apresentadas, é possível saber quanto resíduo foi enviado pelos municípios para os aterros, e onde eles estão localizados.

O Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBIOGÁS) é uma empresa sem fins lucrativos, criada com o objetivo de estudar e promover técnicas de gerenciamento de resíduos orgânicos para geração de recursos e energia nas mais diversas formas de aplicação. Integra a participação de instituições que desenvolvem projetos para a promoção da sustentabilidade e inovação tecnológica nos ramos de bioenergia e biofertilizantes, além de gestão financeira e de capacitação profissional. Em seus estudos e levantamentos, a instituição faz a coleta de dados e análise de potencial de desenvolvimento das atividades, sendo centro de referência para

ampliação de um mercado mais econômica e ambientalmente sustentável (PARQUE TECNOLÓGICO ITAIPÚ, 2020).

As informações coletadas nas fontes citadas compõem uma importante base para a observação e compreensão quanto à relevância do correto destino dos RSU e seu potencial para geração distribuída de energia.

## 4. METODOLOGIA

O desenvolvimento da pesquisa documental foi baseado majoritariamente pela busca de fontes documentais de caráter primário, encontrando dados com pouco ou nenhum tratamento analítico, os quais foram reelaborados de acordo com o objetivo do trabalho. De modo geral, o método de pesquisa utilizou documentos públicos, elaborados pelas instituições responsáveis por planejar ações, coordenar e regulamentar os setores de gerenciamento de resíduos, de recursos energéticos e segurança ambiental (GIL, 2002).

A escolha das fontes utilizadas foi orientada segundo a natureza do problema abordado e estavam alinhadas com os objetivos e hipóteses levantadas pela pesquisa, sendo posteriormente analisadas conforme fundamentação teórica. Com isso, as informações extraídas dos documentos originais em bases primárias foram transformadas em um documento secundário que é este trabalho (KRIPKA; SCHELLER, 2015).

Para a organização dos dados e análises dos potenciais de aproveitamento foi usado o programa Microsoft Excel, no qual os dados foram tabelados, aplicadas as equações apresentadas na revisão bibliográfica e criados diversos gráficos.

### 4.1. Aterro de Cachoeira Paulista – SP

As informações referentes a capacidade operacional e tempo de funcionamento do aterro de Cachoeira Paulista foram obtidos a partir de consultas à trabalhos acadêmicos que trataram de alguma problemática referente ao empreendimento. A pesquisa usou a base de dados do portal de periódicos da Capes, sendo escolhido o trabalho mais recente pertinente ao tema. Também foi importante conhecer a quantidade de resíduos depositados desde o início das operações do aterro em 2006, servindo como base para a estimativa do volume de biogás gerado.

Os dados sobre a quantidade de resíduos destinados ao aterro de Cachoeira Paulista foram encontrados nos relatórios anuais da CETESB. Os documentos usados foram os Inventários Estaduais de Resíduos Sólidos Domiciliares, entre os anos de 2006 e 2011, e posteriormente os Inventários Estaduais de Resíduos Sólidos Urbanos de 2012 até 2019 disponibilizados no site da CETESB, no endereço

<https://cetesb.sp.gov.br/>. Entre os itens apresentados no topo do site, foi escolhida a opção Resíduos em seguida Resíduos Sólidos. Na página seguinte, foi escolhida a opção Resíduos Urbanos e dentro dela Publicações e Relatórios.

Os dados de cada relatório anual foram distribuídos em uma tabela onde consta as quantidades anuais de RSU que as cidades do Vale do Paraíba destinaram para depósito neste aterro. A partir destes dados foi feito uma outra tabela, contendo os montantes anuais recebidos entre 2006 e 2019 e uma projeção de recebimento entre os anos de 2020 e 2035 (ano previsto para o encerramento das atividades). Essa estimativa futura é fundamental para previsão do volume de biogás que será gerado e levou em consideração a taxa de aumento da deposição observada entre os anos de 2013 e 2019. Posteriormente, foi gerado um gráfico ilustrativo do acumulado total resíduos.

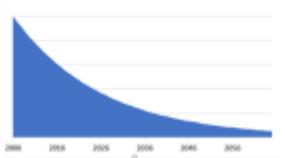
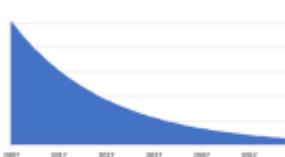
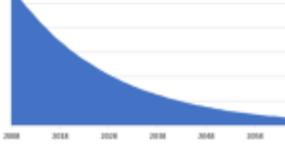
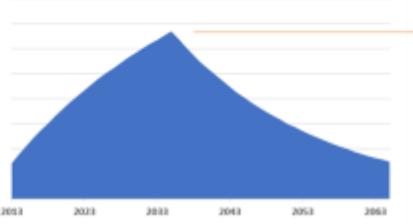
Com relação ao potencial econômico previsto para o aproveitamento do volume de metano projetado foram analisadas duas oportunidades. Uma delas considera a produção e comercialização de energia elétrica, e a outra, a venda de créditos de descarbonização no âmbito do programa RenovaBio.

Para a elaboração do cenário de aproveitamento econômico de ambas as aplicações, foi considerado um tempo, entre a apresentação deste trabalho e a possível implantação dos projetos, para a preparação de estudos técnicos mais aprofundados e construção da infraestrutura adequada. Com isso, a estimativa de produção de energia elétrica e de contabilização de CBios só foram analisadas para o início do ano de 2023. Estendendo-se por 30 anos a partir de 2023, uma vez que estimativas financeiras ao longo de muitos anos tendem a não expressar veracidade.

### **Potencial de produção de biogás**

Para estimar a produção de gás, foram inseridas na Equação (3) as quantidades anuais acumuladas de RSU de forma a expressar a produção anual de biogás do aterro. Em síntese, o gráfico da produção de biogás ilustra os resultados da Equação (3) aplicada ano a ano sobre o montante de resíduos e somados ao longo do tempo, conforme Equação (1) (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2006). A metodologia é detalhada na Figura 11.

Figura 11 - Sequência de cálculos para obtenção do potencial de geração de gás metano

Resíduo depositado no ano de:	Liberação de gás metano ao longo dos anos	Aplicando a Equação (3) $Q_x = kR_T L_0 e^{-k(x-T)}$	Comportamento gráfico da curva de decaimento de 1 <sup>a</sup> ordem
2006	2006	$Q_{2006} = kR_{2006} L_0 e^{-k(2006-2006)}$	
$R_T = R_{2006}$	2007	$Q_{2007} = kR_{2006} L_0 e^{-k(2007-2006)}$	
	2008	$Q_{2008} = kR_{2006} L_0 e^{-k(2008-2006)}$	
	Continua para os próximos anos...		
2007	2007	$Q_{2007} = kR_{2007} L_0 e^{-k(2007-2007)}$	
$R_T = R_{2007}$	2008	$Q_{2008} = kR_{2007} L_0 e^{-k(2008-2007)}$	
	Continua para os próximos anos...		
2008	2008	$Q_{2008} = kR_{2008} L_0 e^{-k(2008-2008)}$	
$R_T = R_{2008}$	Continua para os próximos anos...		
Gás metano liberado no ano de:		Aplicando a Equação (1) $\sum Q_x = kL_0 \sum (R_T e^{-k(x-T)})$	
2006	$Q_x = Q_{2006}$	$\sum Q_{2006} = kL_0 \sum (R_T e^{-k(2006-T)})$	$Q_{2006} = kR_{2006} L_0 e^{-k(2006-2006)}$
2007	$Q_x = Q_{2007}$	$\sum Q_{2007} = kL_0 \sum (R_T e^{-k(2007-T)})$	$Q_{2007} = kR_{2006} L_0 e^{-k(2007-2006)}$ $Q_{2007} = kR_{2007} L_0 e^{-k(2007-2007)}$
2008	$Q_x = Q_{2008}$	$\sum Q_{2008} = kL_0 \sum (R_T e^{-k(2008-T)})$	$Q_{2008} = kR_{2006} L_0 e^{-k(2008-2006)}$ $Q_{2008} = kR_{2007} L_0 e^{-k(2008-2007)}$ $Q_{2008} = kR_{2008} L_0 e^{-k(2008-2008)}$
Continua para os próximos anos...		Os valores anuais são expressos conforme o modelo gráfico	
			
		Término da deposição de resíduos	

Fonte: Elaborado pelo autor

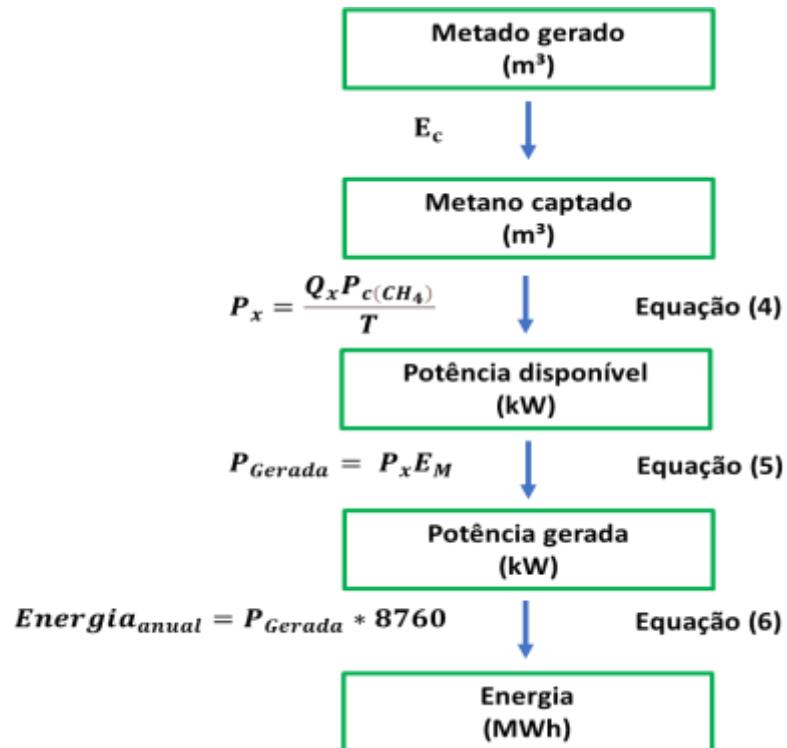
Para a realização dos cálculos, levou-se em consideração as características dos resíduos e a condição climática média da região em que se encontra o aterro. As estimativas de produção de biogás calculadas neste trabalho consideram  $k = 0,05$  e  $L_o = 140 (m^3_{CH_4})$  de acordo com o perfil climático da região (PREFEITURA DE CRUZEIRO, 2020) e a composição dos resíduos, com 65% de matéria orgânica (BRITO, 2014).

### **Potencial de produção de energia**

A quantidade de biogás estimada para aproveitamento econômico foi o volume total reduzido por um fator de eficiência de coleta de gases, devido as inúmeras possibilidades de perdas, seja pela liberação na superfície do aterro, ou ineficiência no método de captação. O potencial energético calculado levou em consideração a utilização efetiva de 70% do volume de gás gerado pelo aterro (CANDIANI; VIANA, 2018), sendo chamado de “Metano captado”.

Os valores obtidos foram aplicados na Equação (4), resultando na “Potência disponível”, posteriormente aplicada a Equação (5) adotando um fator médio de conversão de energia para os motogeradores de 33% (TOLMASQUIM, 2016), encontrando assim a “Potência gerada”. Por fim, foi aplicada a Equação (6) para expressar a energia produzida em MWh ao longo dos anos de operação, multiplicado por um fator de 90%, a fim de representar o potencial perdido em períodos de paradas para manutenção dos equipamentos e outras complicações inerentes à atividade. A Figura 12 apresenta o passo a passo para realização desses cálculos.

Figura 12 - Sequência de cálculos para estimativa da produção de energia elétrica

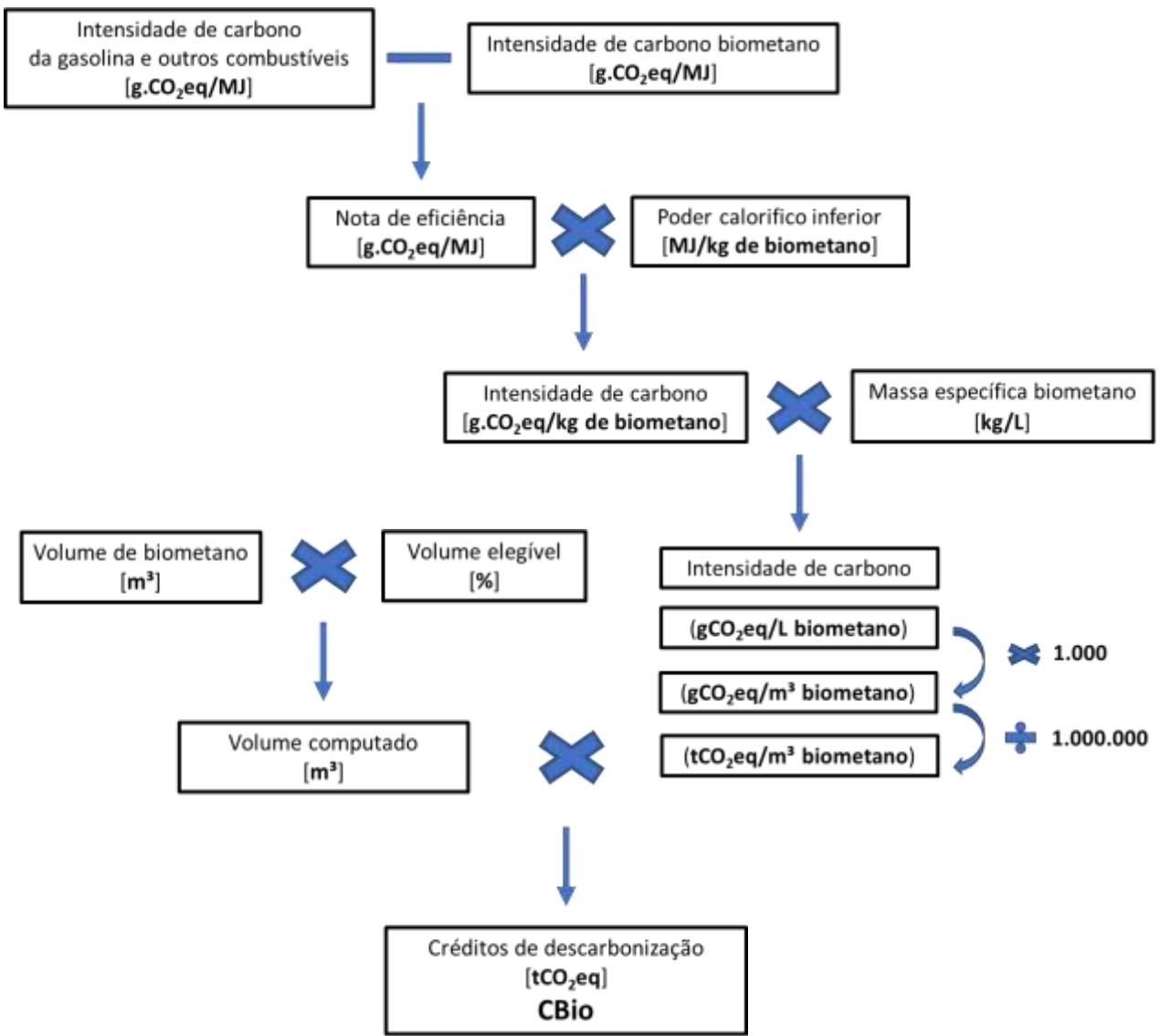


Fonte: Elaborado pelo autor

### Potencial de geração de CBios (créditos de descarbonização)

Para encontrar o potencial de CBios a serem emitidos, foi utilizada a metodologia e os dados da ANP, que desenvolveu uma ferramenta de cálculo da intensidade de carbono de biocombustíveis, denominada RenovaCalc (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL, 2020). O passo a passo dos cálculos para encontrar a quantidade de CBios emitidos é descrita na Figura 13.

Figura 13 - Sequência de cálculos para obtenção do número de CBios



Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados apresentados na Tabela 2 mostram os valores usados nos cálculos básicos para obtenção da intensidade de carbono acumulada pelo agente produtor de biometano em comparação com uma distribuidora de combustíveis. A “Nota de eficiência” é obtida pela subtração entre a “Intensidade de carbono” do combustível fóssil (gasolina e outros) e a “Intensidade de carbono” do biocombustível (biometano). O “Volume elegível” é o percentual que reduz o total contabilizado, prevendo erros nas estimativas. A “Intensidade de carbono” expressa em unidades de [g.CO<sub>2</sub>eq/kg de biometano] foi obtida multiplicando o “Poder calorífico inferior” do biometano pela “Nota de eficiência”. Posteriormente, a partir da “Massa específica”

converteu-se a intensidade de carbono dada em massa, com unidade de [g.CO<sub>2</sub>eq/kg], para sua expressão segundo o volume de biometano, em unidades de [tCO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup>].

Tabela 2 - Cálculos básicos da geração de Cbios

Parâmetro	valor
Intensidade de carbono biometano (g.CO <sub>2</sub> eq/MJ)	3,50
Intensidade de carbono gasolina e outros (g.CO <sub>2</sub> eq/MJ)	86,70
Nota de eficiência (g.CO <sub>2</sub> eq/MJ)	83,20
Volume elegível (%)	90%
Poder calorífico inferior (MJ/kg de biometano)	48,25
Intensidade de carbono (g.CO <sub>2</sub> eq/kg de biometano)	4014,40
Massa específica biometano (kg/L)	0,000757605
Intensidade de carbono (gCO <sub>2</sub> eq/L biometano)	3,04
Intensidade de carbono (gCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> biometano)	3041,33
Intensidade de carbono (tCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> biometano)	0,003041330
Gás metano captado do aterro	70%

Fonte: Elaborado pelo autor com base em AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL, 2020.

No caso analisado, a intensidade de carbono real do aterro que produz biometano não é conhecida, pois demanda análise individual. Por isso, os valores aqui atribuídos para a intensidade de carbono foram aqueles previamente estabelecidos pela ANP na planilha RenovaCalc. Foi estimada a troca de créditos entre um produtor de biometano e uma distribuidora de combustíveis.

Para encontrar o total de créditos emitidos, o valor obtido para a intensidade de carbono, expressa por unidades de [tCO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> biometano] foi multiplicada pelo volume anual de gás metano captado, o qual corresponde a 70% do metano gerado anualmente pelo aterro.

#### 4.2. Contexto nacional dos RSU

Visando compreender a problemática do gerenciamento dos RSU no país e comparar a situação dos municípios que dispõem seus resíduos no aterro de Cachoeira Paulista com a atual condição nacional, foram observados e analisados os

dados apontados pelo documento Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019. Essa edição e todas as outras dos relatórios dessa categoria foram encontradas no site da ABRELPE, no endereço [www.abrelpe.com.br](http://www.abrelpe.com.br) dentro da aba Panorama.

A elaboração dos gráficos e tabelas apresentados contou com o uso do software Microsoft Excel. Primeiramente os dados foram organizados em tabelas e depois criado os gráficos com os valores.

#### **4.3. Matriz energética nacional e o biogás**

Com o objetivo de conhecer as principais fontes de energia no Brasil e discutir a implantação de unidades de geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro sanitário, foi realizada uma pesquisa acerca do perfil da matriz energética nacional.

A pesquisa contou com os dados presentes no Balanço Energético Nacional de 2020. O acesso ao documento principal foi feito a partir do site da EPE, no endereço [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br). Entrando na aba Publicações há um campo de pesquisa, na caixa Área de Atuação, na opção Planejamento Energético e na caixa Categoria a escolha foi feita por Balanço Energético Nacional. Entre os itens listados na sequência, foi selecionado o BEN 2020.

Quanto aos dados referentes à produção e distribuição da capacidade instalada das fontes de biogás no território nacional, eles foram obtidos a partir de consulta à Nota Técnica: N° 02/2019 – Panorama do biogás no Brasil em 2018 (CIBIOGÁS, 2019).

Também com o auxílio do software Microsoft Excel, os dados foram inicialmente tabelados e posteriormente criados os gráficos que aparecem na sessão de resultados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O foco de estudo deste trabalho aborda o aproveitamento dos recursos disponíveis no aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP, sobretudo devido ao seu perfil de operação, local onde são destinados os resíduos da Escola de Engenharia de Lorena (EEL-USP) e cidades da região do Vale do Paraíba (MARQUES, 2018).

As estimativas de produção de gás metano é um importante parâmetro para a análise do potencial de impacto ambiental e o possível aproveitamento econômico que pode ser feito a partir do adequado tratamento e uso desse passivo ambiental.

### 5.1. Aterro de Cachoeira Paulista – SP

Segundo informações obtidas por Brito (2014) o aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP teve suas atividades iniciadas em 2006, contando com capacidade para receber aproximadamente 350t de resíduos diariamente, estando apto a receber os diversos RSU oriundos das cidades da região do Vale do Paraíba. Esta informação é confirmada ao se conferir os dados disponibilizados anualmente pela agência reguladora em seus inventários anuais, uma vez que os volumes atualmente recebidos pelo aterro são da ordem de 330 t/dia (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2007 – 2020).

Os dados obtidos nos inventários foram organizados na Tabela 3, a qual mostra a participação efetiva de 14 cidades da região do Vale do Paraíba, assim como o encaminhamento de um baixo volume de resíduos para o aterro durante os primeiros anos de sua operação. Em 2006 o montante cadastrado foi de apenas 98 toneladas/dia, e até 2012 recebeu quantidades cada vez maiores, passando para 326 toneladas/dia em 2013 e 338 toneladas diárias em 2019 (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2007 – 2020).

Tabela 3 - Toneladas de RSU destinadas ao aterro de Cachoeira Paulista segundo dados da CETESB

<b>Cidade</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>
Aparecida				14,8	13,8	13,8	13,81
Areias							
Cachoeira Paulista	9,6	9,8	10,8	11	9,8	9,9	9,97
Canas			1,6	1,6	1,6	1,7	1,67
Cruzeiro					30	30,1	30,24
Cunha				4,6	4,9	4,8	4,83
Guaratinguetá	53,7	54,4	53,6	53,9	53,4	53,7	53,95
Lavrínhas	2,5	2,6	2,4	2,5	2,4	2,4	2,45
Lorena	32,2	32,6	31,7	31,9	32,1	32,2	32,34
Potim			7,6	7,9	5,9	6	6,15
Queluz				3,9	3,7	3,8	3,82
Roseira			3,5	3,6	3,6	3,7	3,71
São José do Barreiro				1,1	1,1	1,1	1,15
Silveiras						1,2	1,16
Bananal				3,2			
<b>TOTAL DIÁRIO</b>	<b>98</b>	<b>99,4</b>	<b>111,2</b>	<b>136,8</b>	<b>162,3</b>	<b>164,4</b>	<b>165,25</b>
<b>TOTAL ANUAL</b>	<b>35.770</b>	<b>36.281</b>	<b>40.588</b>	<b>49.932</b>	<b>59.239,5</b>	<b>60.006</b>	<b>60.316,25</b>
<b>Cidade</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>
Aparecida	28,5	28,53	28,55	28,58	28,6	28,48	28,5
Areias					1,82	1,82	1,82
Cachoeira Paulista	20,77	20,93	21,1	21,26	21,41	21,6	21,77
Canas	3,07	3,11	3,15	3,19	3,23	3,29	3,34
Cruzeiro	62,69	62,95	63,21	63,47	63,71	63,85	64,11
Cunha	8,67	8,63	8,6	8,57	8,54	8,43	8,39
Guaratinguetá	100,88	101,49	102,09	102,67	103,24	103,8	104,42
Lavrínhas	4,47	4,5	4,53	4,56	4,59	4,63	4,66
Lorena	67,09	67,42	67,74	68,06	68,37	68,6	68,93
Potim	11,41	11,67	11,92	12,16	12,4	12,82	13,08
Queluz	7,02	7,13	7,23	7,34	7,43	7,59	7,7
Roseira	6,76	6,82	6,88	6,93	6,99	7,06	7,12
São José do Barreiro	2,06	2,06	2,06		2,06	2,04	2,04
Silveiras	2,12	2,13	2,14	2,15	2,17	2,18	2,19
Bananal							
<b>TOTAL DIÁRIO</b>	<b>325,51</b>	<b>327,37</b>	<b>329,2</b>	<b>328,94</b>	<b>334,56</b>	<b>336,19</b>	<b>338,07</b>
<b>TOTAL ANUAL</b>	<b>118.811,2</b>	<b>119.490,1</b>	<b>120.158</b>	<b>120.063,1</b>	<b>122.114,4</b>	<b>122.709,4</b>	<b>123.395,6</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

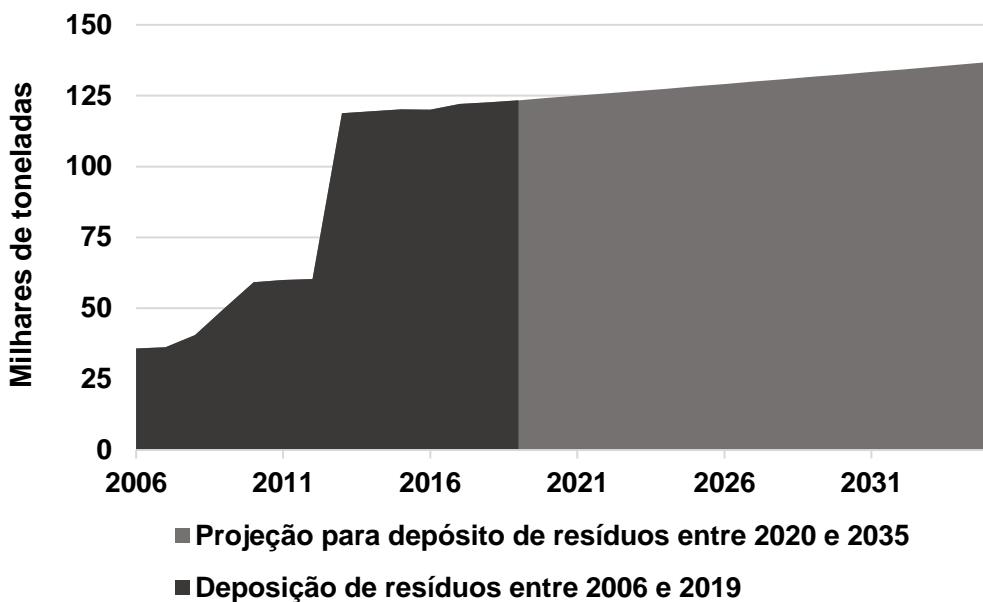
Entre 2013 e 2019 observou-se uma taxa de crescimento constante de aproximadamente 0,65% ao ano. Esse valor é menor em relação ao aumento na produção de RSU observado por ABRELPE (2019) entre os anos de 2017 e 2018, que foi ligeiramente menor do que 1%. Nesse sentido, por ser um valor mais conservador, e expressar um aumento real de acúmulo de resíduos para esta localidade nos últimos anos, essa taxa de 0,65% foi usada para o cálculo das estimativas futuras da quantidade de resíduos que poderá ser acumulada. Assim, a Tabela 4 apresenta os montantes já depositados no aterro e uma projeção para os próximos anos, servindo de base para a elaboração do gráfico da Figura 14, que ilustra essas informações ao longo dos anos.

Tabela 4 - Deposição de RSU no aterro sanitário de Cachoeira Paulista

Resíduos registrados pela CETESB entre 2006 e 2019			Projeção para deposição de resíduos entre 2020 e 2035		
Ano	Resíduos depósito (T)	Resíduos (t/dia)	Ano	Resíduos depósito (T)	Resíduos (t/dia)
2006	98,0	35.770	2020	340,3	124.198
2007	99,4	36.281	2021	342,5	125.005
2008	111,2	40.588	2022	344,7	125.817
2009	136,8	49.932	2023	346,9	126.635
2010	162,3	59.240	2024	349,2	127.458
2011	164,4	60.006	2025	351,5	128.287
2012	165,3	60.316	2026	353,8	129.121
2013	325,5	118.811	2027	356,1	129.960
2014	327,4	119.490	2028	358,4	130.805
2015	329,2	120.158	2029	360,7	131.655
2016	328,9	120.063	2030	363,0	132.511
2017	334,6	122.114	2031	365,4	133.372
2018	336,2	122.709	2032	367,8	134.239
2019	338,1	123.396	2033	370,2	135.112
			2034	372,6	135.990
			2035	375,0	136.874
<b>TOTAL (toneladas)</b>		<b>1.188.874</b>	<b>TOTAL (toneladas)</b>		<b>2.087.038</b>

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 14 - Acumulado de RSU no aterro de Cachoeira Paulista de 2006 a 2019 (CETESB) e entre 2020 e 2035 (projeção)



Fonte: Elaborado pelo Autor

No gráfico é observado aumentos irregulares do início de suas operações até 2012, o que possivelmente se deve à adoção gradual das cidades da região do Vale do Paraíba em enviar seus RSU para este local. Contudo, depois de 2013, o aumento acontece em pequenas proporções, o que pode ser explicado pelo aumento natural da produção de resíduos dos municípios ao longo do tempo e aumento da população e perfil de consumo das pessoas. A taxa de crescimento observada foi extrapolada para os demais anos da projeção, de modo a ter dados mais próximos da realidade.

### Potencial de produção de biogás

O potencial de produção representa o volume estimado de biogás gerado ao longo do tempo pelos resíduos acumulados no aterro. Essa estimativa serve como base para análises iniciais de dimensionamento dos impactos ambientais acarretados pela liberação dos gases na atmosfera e possível aproveitamento da capacidade econômica.

De acordo com Candiani e Silva (2011) a fração de gás metano contido na mistura de gases representa aproximadamente 50% do total, ou seja, os resultados obtidos pela aplicação da Equação (3) que calcula o volume de gás metano a partir

da quantidade de resíduos, representam metade do total de gases gerados. O metano é o principal gás causador do Efeito Estufa e com maior potencial de aproveitamento econômico.

A Equação (3) foi aplicada aos dados da Tabela 4 e gerou os volumes de gás metano observados na Tabela 5. As estimativas foram calculadas a partir de 2006 até 60 anos depois do início das operações, uma vez que o período de liberação dos gases continua por décadas depois do fechamento das atividades do aterro.

Tabela 5 - Estimativa para produção anual de gás metano

Volume estimado entre os anos de 2006 e 2022		Volume estimado a partir do ano de 2023		(continua)
Ano	Produção anual de metano (m <sup>3</sup> )	Ano	Produção anual de metano (m <sup>3</sup> )	
2006	250.390	2023	8.687.014	
2007	492.145	2024	9.155.552	
2008	752.259	2025	9.607.038	
2009	1.065.095	2026	10.042.342	
2010	1.427.826	2027	10.462.292	
2011	1.778.232	2028	10.867.673	
2012	2.113.721	2029	11.259.235	
2013	2.842.311	2030	11.637.691	
2014	3.540.121	2031	12.003.718	
2015	4.208.573	2032	12.357.963	
2016	4.843.760	2033	12.701.039	
2017	5.462.328	2034	13.033.530	
2018	6.054.892	2035	13.355.993	
2019	6.623.361	2036	12.704.614	
2020	7.169.719	2037	12.085.002	
2021	7.695.082	2038	11.495.610	
2022	8.200.510	2039	10.934.962	
		2040	10.401.658	
		2041	9.894.363	
		2042	9.411.809	

Tabela 6 - Estimativa para produção anual de gás metano

(conclusão)

Volume estimado entre os anos de 2006 e 2022		Volume estimado a partir do ano de 2023	
Ano	Produção anual de metano (m <sup>3</sup> )	Ano	Produção anual de metano (m <sup>3</sup> )
		2043	8.952.790
		2044	8.516.157
		2045	8.100.819
		2046	7.705.738
		2047	7.329.924
		2048	6.972.440
		2049	6.632.390
		2050	6.308.924
		2051	6.001.235
		2052	5.708.551
		2053	5.430.142
		2054	5.165.310
		2055	4.913.395
		2056	4.673.766
		2057	4.445.824
		2058	4.228.998
		2059	4.022.748
		2060	3.826.556
		2061	3.639.933
		2062	3.462.411
		2063	3.293.547
		2064	3.132.919
		2065	2.980.125
<b>TOTAL</b>	<b>64.520.325</b>	<b>TOTAL</b>	<b>347.543.739</b>

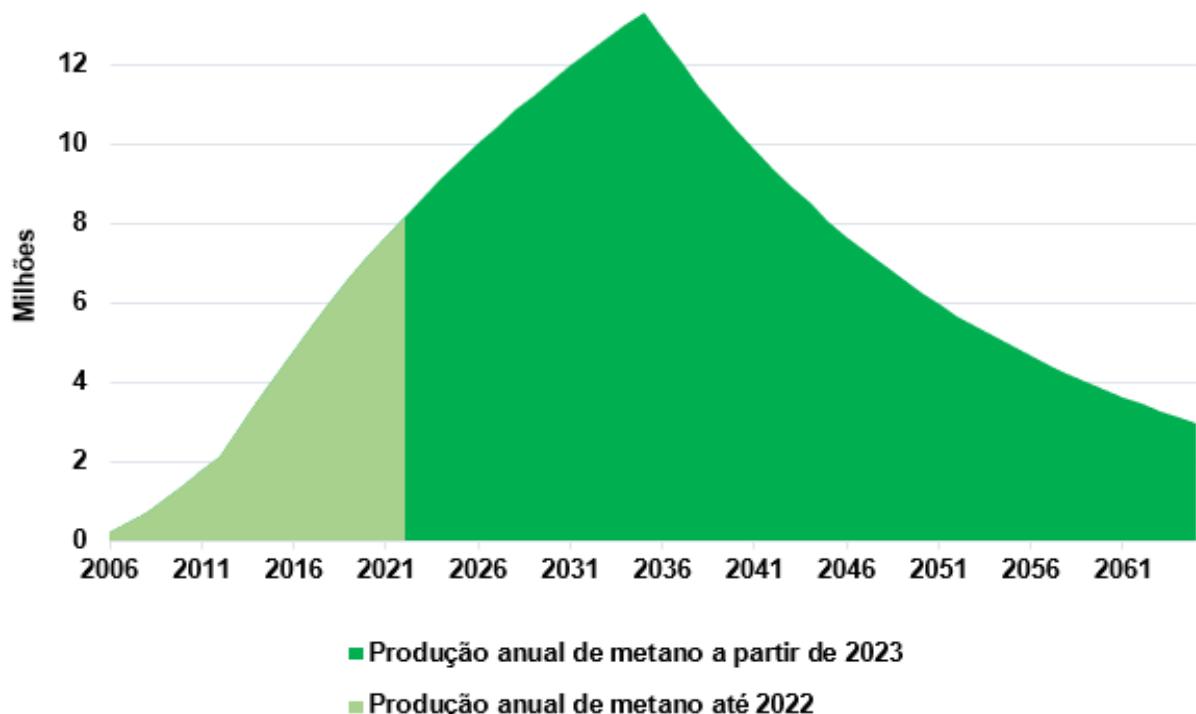
Fonte: Elaborado pelo autor

Algumas informações importantes a serem consideradas diante desses valores é o volume de gás desperdiçado até o final de 2022, sendo aproximadamente 65

milhões de m<sup>3</sup>, e o volume que poderá ser usado caso sejam implantados os projetos de aproveitamento, chegando a cerca de 348 milhões de m<sup>3</sup>.

Ao observar a Figura 15, elaborada segundo os valores da Tabela 5, nota-se uma curva crescente na produção anual de gás, chegando ao volume máximo de 13,35 milhões de m<sup>3</sup> no ano de fechamento do aterro, em 2035, seguida por uma queda exponencial até que todo o gás seja liberado depois de décadas.

Figura 15 - Gráfico do potencial de produção anual de gás metano (m<sup>3</sup>)



Fonte: Elaborado pelo autor

A Equação (3) expressa um decaimento na liberação de gases com o passar do tempo, ou seja, à medida que os anos avançam é menor o volume de gás gerado pelo resíduo acumulado. Contudo, a constante deposição de matéria orgânica proporciona uma crescente produção de gás até o final das operações do aterro. Posteriormente, por não haver mais acréscimo de quantidades de lixo, o volume gerado de gás continua em declínio por longos anos.

### Potencial de produção de energia

Uma das aplicações mais importantes para o aproveitamento econômico do biogás é sua utilização para geração de energia elétrica. Para tanto, os gases passam por um processo de tratamento, de modo que o produto resultante seja um biocombustível com alta concentração de metano, acima de 90%, conhecido como biometano. Sua alta pureza proporciona uma queima mais eficiente, além de aumentar a vida útil dos equipamentos, preservando suas partes internas.

O potencial energético calculado é apresentado na Tabela 7, que mostra todos os valores encontrados como resultados da aplicação das Equações (4), (5) e (6), tomando como base os volumes anuais de gás metano captado do aterro.

Tabela 7 - Potencial de geração de energia elétrica para o aterro de Cachoeira Paulista

(continua)

Ano	Metano captado (m <sup>3</sup> )	Potência disponível (kW)	Potência gerada (kW)	Energia (MWh)
2023	6.080.909	6.851,05	2.260,85	17.825
2024	6.408.886	7.220,56	2.382,79	18.786
2025	6.724.927	7.576,63	2.500,29	19.712
2026	7.029.640	7.919,94	2.613,58	20.605
2027	7.323.604	8.251,13	2.722,87	21.467
2028	7.607.371	8.570,84	2.828,38	22.299
2029	7.881.465	8.879,64	2.930,28	23.102
2030	8.146.384	9.178,11	3.028,78	23.879
2031	8.402.603	9.466,78	3.124,04	24.630
2032	8.650.574	9.746,16	3.216,23	25.357
2033	8.890.727	10.016,73	3.305,52	26.061
2034	9.123.471	10.278,95	3.392,05	26.743
2035	9.349.195	10.533,26	3.475,98	27.405
2036	8.893.229	10.019,55	3.306,45	26.068
2037	8.459.502	9.530,89	3.145,19	24.797
2038	8.046.927	9.066,06	2.991,80	23.587
2039	7.654.474	8.623,90	2.845,89	22.437
2040	7.281.160	8.203,31	2.707,09	21.343
2041	6.926.054	7.803,23	2.575,07	20.302
2042	6.588.266	7.422,66	2.449,48	19.312
2043	6.266.953	7.060,66	2.330,02	18.370
2044	5.961.310	6.716,30	2.216,38	17.474
2045	5.670.573	6.388,75	2.108,29	16.622
2046	5.394.016	6.077,16	2.005,46	15.811
2047	5.130.947	5.780,78	1.907,66	15.040
2048	4.880.708	5.498,84	1.814,62	14.306

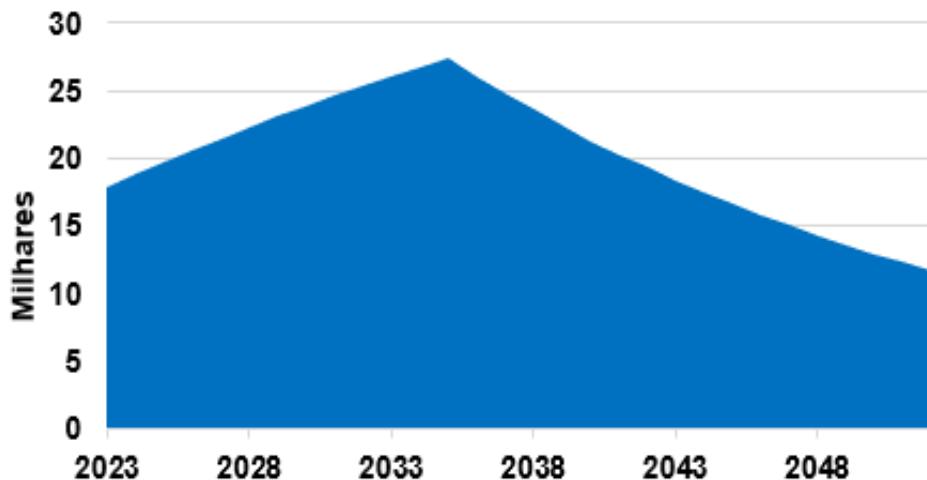
Tabela 8 - Potencial de geração de energia elétrica para o aterro de Cachoeira Paulista

Ano	Metano captado (m <sup>3</sup> )	Potência disponível (kW)	Potência gerada (kW)	(conclusão)
				Energia (MWh)
2049	4.642.673	5.230,66	1.726,12	13.609
2050	4.416.247	4.975,56	1.641,93	12.945
2051	4.200.864	4.732,90	1.561,86	12.314
2052	3.995.986	4.502,07	1.485,68	11.713
<b>TOTAL</b>	<b>206.029.645</b>			<b>603.919</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

Para ilustrar melhor o potencial elétrico desse projeto, os dados da Tabela 7, referentes a “Energia” produzida, foram representados na Figura 16. Nele o comportamento da curva do potencial de geração de energia elétrica, acompanha a disponibilidade do gás combustível.

Figura 16 - Gráfico do potencial de geração anual de energia elétrica em MWh



Fonte: Elaborado pelo autor

O aproveitamento desse potencial depende da viabilidade econômica da implantação de equipamentos para operar ao longo dos anos em capacidade máxima. Uma opção é a instalação de uma unidade de tratamento de biogás capaz de processar um amplo volume de biometano e uma termoelétrica que possa ser abastecida em toda sua capacidade pelo maior tempo possível. Por exemplo, para o

caso analisado, a instalação de motogeradores para produção de 20mil MWh anuais operariam com capacidade máxima ao longo de 16 anos, a partir de 2026 até 2041. Nesse período a sobra de oferta de combustível pode ser vendido como equivalente ao gás natural, quando a oferta diminuir, depois de 2041, os módulos geradores poderão vir a ser parcialmente desativados.

Considerando o montante de energia que pode ser produzido em 2023, que é de 17.825 MWh sendo comercializado à um preço de R\$200,00/MWh, um valor conservador, abaixo daqueles negociados nos Leilões de Energia Elétrica de 2019, organizados pelo MME, obtém-se uma receita bruta de aproximadamente R\$3.565.000,00 (BRASIL; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019).

### **Potencial de geração de CBios (créditos de descarbonização)**

O período analisado para o aproveitamento econômico dos CBios também foi de 30 anos a partir de 2023, coincidindo com a produção de energia elétrica. Nesse período, o “Metano consumido” corresponde ao percentual de 70% do total de metano produzido, equivalente ao montante que foi captado e transformado em combustível ou eletricidade. Nesse contexto, a Tabela 9 traz esses volumes, incluindo o que foi considerado como “Volume elegível”, que corresponde a 90% do que foi consumido, e as toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, obtidas pela multiplicação da intensidade de carbono, dada em [tCO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> biometano], pelos valores de “Volume elegível”. Cada tonelada de CO<sub>2</sub> eq é igual a 1 crédito de descarbonização, ou CBio.

Tabela 9 - Potencial de geração de CBios para o aterro de Cachoeira Paulista

(continua)

Ano	Metano consumido (m <sup>3</sup> )	Volume elegível biometano (m <sup>3</sup> )	Toneladas (CO <sub>2</sub> eq/ano)
2023	6.080.909	5.472.819	16.645
2024	6.408.886	5.767.997	17.542
2025	6.724.927	6.052.434	18.407
2026	7.029.640	6.326.676	19.242
2027	7.323.604	6.591.244	20.046
2028	7.607.371	6.846.634	20.823
2029	7.881.465	7.093.318	21.573
2030	8.146.384	7.331.745	22.298

Tabela 10 - Potencial de geração de CBios para o aterro de Cachoeira Paulista

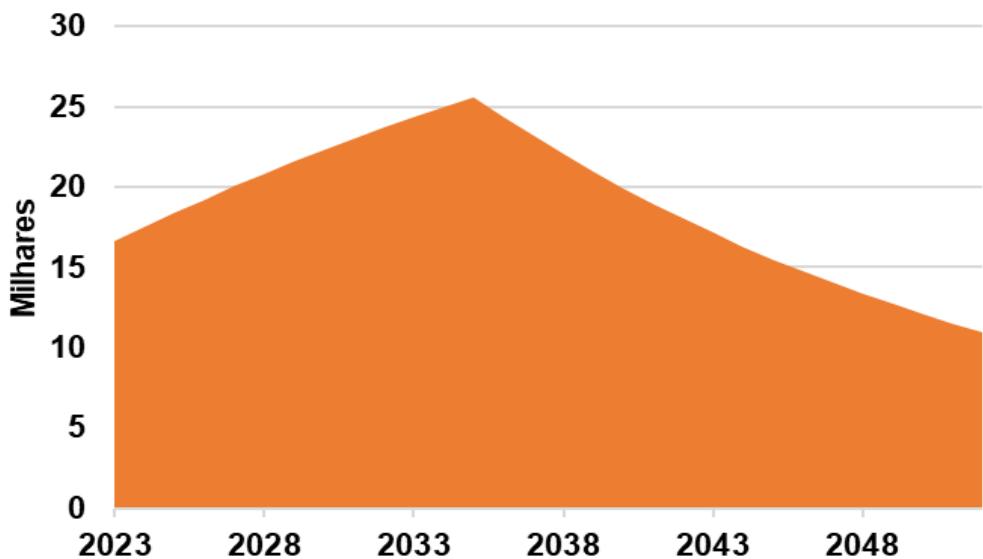
(conclusão)			
2031	8.402.603	7.562.343	23.000
2032	8.650.574	7.785.517	23.678
2033	8.890.727	8.001.654	24.336
2034	9.123.471	8.211.124	24.973
2035	9.349.195	8.414.276	25.591
2036	8.893.229	8.003.907	24.343
2037	8.459.502	7.613.551	23.155
2038	8.046.927	7.242.234	22.026
2039	7.654.474	6.889.026	20.952
2040	7.281.160	6.553.044	19.930
2041	6.926.054	6.233.449	18.958
2042	6.588.266	5.929.440	18.033
2043	6.266.953	5.640.258	17.154
2044	5.961.310	5.365.179	16.317
2045	5.670.573	5.103.516	15.521
2046	5.394.016	4.854.615	14.764
2047	5.130.947	4.617.852	14.044
2048	4.880.708	4.392.637	13.359
2049	4.642.673	4.178.406	12.708
2050	4.416.247	3.974.622	12.088
2051	4.200.864	3.780.778	11.499
2052	3.995.986	3.596.387	10.938
<b>Total</b>	<b>206.029.645</b>	<b>185.426.681</b>	<b>563.944</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados correspondentes às toneladas anuais de CO<sub>2</sub>eq foram apresentados também segundo a Figura 17, mostrando um panorama mais visual do que pode ser a produção de créditos de descarbonização na unidade de Cachoeira Paulista.

Contabilizando a estimativa de comercialização dos CBios gerados apenas em 2023, que podem chegar a um montante de 16.645 unidades, o que corresponderia à 0,11% da meta de negociação de créditos estipulada pelo MME para o programa RenovaBio em 2020 (UNICA, 2020). Sendo negociados a um preço médio de R\$40, um pouco abaixo da média do que foi negociado desde o início da vigência do programa, espera-se uma receita bruta de aproximadamente R\$665.800,00 (BOSSLE, 2020).

Figura 17 - Gráfico do potencial de produção anual de CBios



Fonte: Elaborado pelo autor

A soma da receita com a comercialização da energia elétrica e dos créditos CBio, chega a um total de R\$4.230.800,00. Como comparativo do que representam esses valores, ele é maior do que o montante gasto pela prefeitura de Cachoeira Paulista com Segurança Pública em 2020, que foi de R\$3.980.000,00 (E-GOV; GEOSIAP, 2020).

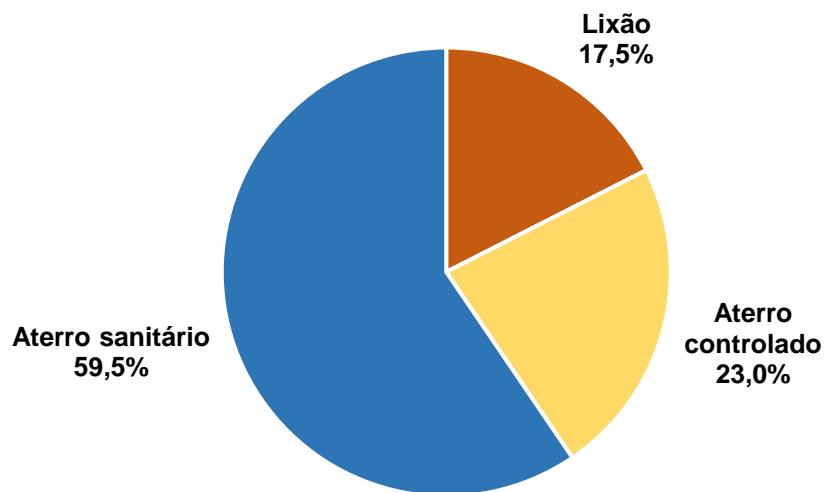
## 5.2. Contexto nacional dos RSU

A importância dessa análise se deve ao entendimento da problemática enfrentada pelos municípios do país e a potencialidade que existe quanto a utilização desses recursos que em grande parte ainda são considerados apenas como passivos ambientais e causadores de poluição.

Em 2018 foram gerados no Brasil cerca de 79 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos – RSU, dos quais 92%, ou seja, 72,7 milhões foram coletados. Deste montante, 59,5% ou 43,2 milhões tiveram destino adequado em aterros sanitários, contudo esse número ainda é preocupante, uma vez que 40,5% do que foi coletado, o equivalente a 29,5 milhões de toneladas de rejeitos (uma média de 80 mil toneladas/dia) foram irregularmente depositados em locais como lixões ou aterros controlados, promovendo poluição ambiental e impactos negativos à saúde

humana e dos ecossistemas (ABRELPE, 2019). A proporção entre a quantidade de resíduos e o método de disposição adotado mostrada na Figura 18.

Figura 18 - Disposição final do montante de RSU, por tipo de destinação em 2018



Fonte: (ABRELPE, 2019)

utilizados de descarte de resíduos, a Tabela 11 organiza a distribuição do número de cidades, em suas regiões geográficas, divididas pelos métodos de disposição adotados.

Tabela 11 - Distribuição dos municípios, por tipo de disposição final adotada

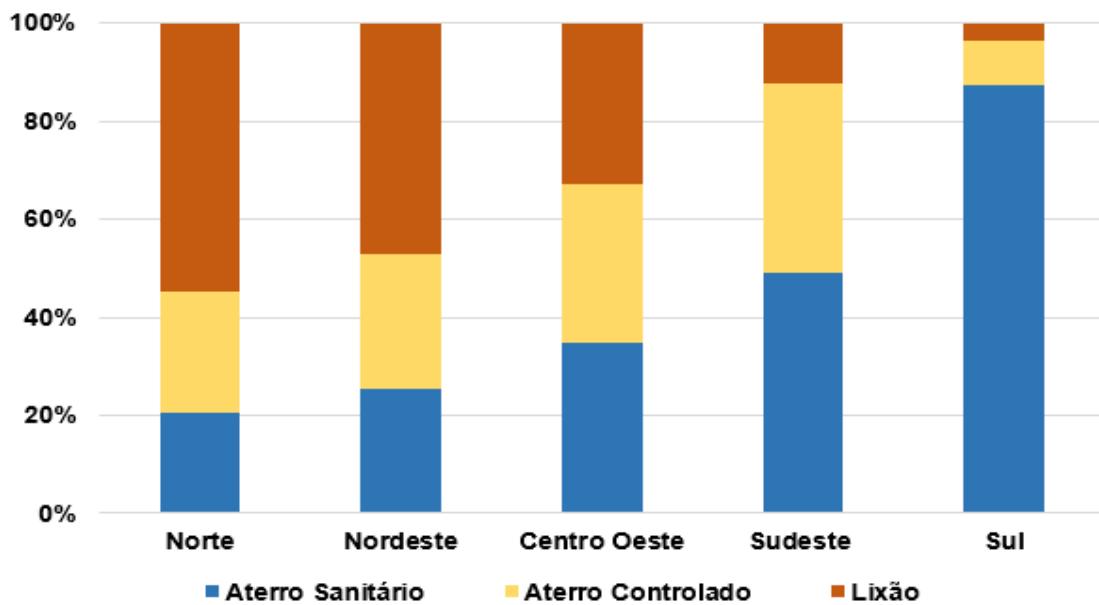
Disposição Final	Regiões e Brasil - 2018					
	Norte	Nordeste	Centro Oeste	Sudeste	Sul	Brasil
Aterro Sanitário	93	454	162	820	1.040	2569
Aterro Controlado	110	496	152	641	109	1508
Lixão	247	844	153	207	42	1493
TOTAL	450	1794	467	1668	1191	5570

Fonte: (ABRELPE, 2019)

Esses dados foram usados para a elaboração da Figura 19 que mostra o percentual dessa distribuição dos municípios segundo a disposição final de seus RSU.

Com isso, pode-se inferir que muitos municípios não descartam adequadamente os RSU e que esta situação precisa ser melhorada para os próximos anos, de modo a atender a Política Nacional dos Resíduos Sólidos vigente no Brasil.

Figura 19 - Distribuição percentual dos municípios quanto a disposição final dos RSU



Fonte: Elaborado pelo autor com base em ABRELPE, 2019

No que se refere ao aterro analisado, ele contribui para que 14 cidades da região do Vale do Paraíba estejam adequadas quanto a disposição final de seus RSU.

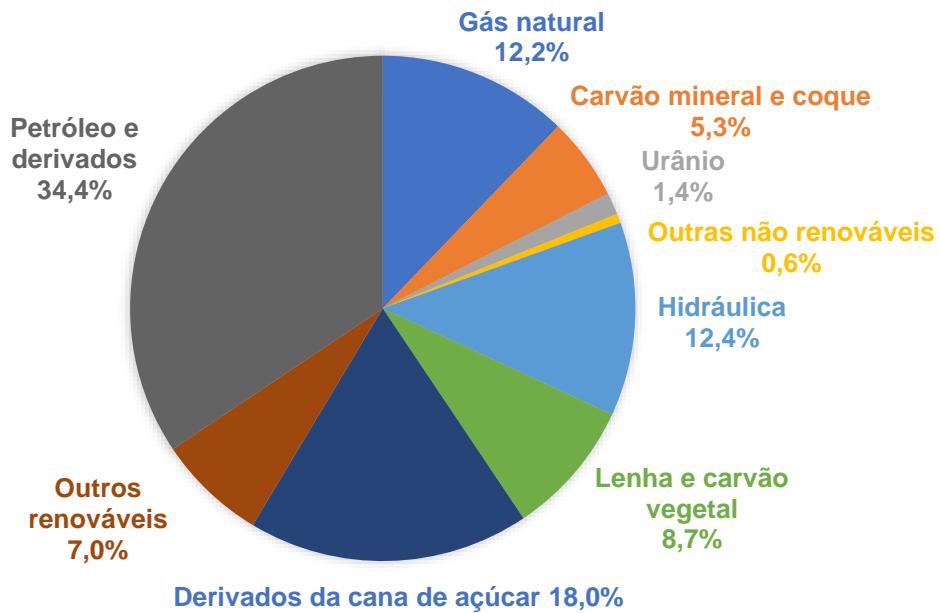
Quanto à quantidade de resíduos acumulados no ano de 2018, segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2020) Cachoeira Paulista recebeu um total de 122.709 toneladas de RSU, o equivalente a 0,17% de todo resíduo coletado no Brasil no mesmo período, e 0,28% do montante que foi encaminhado para aterros sanitários.

### 5.3. Matriz energética nacional e o biogás

Segundo o relatório do Balanço Energético Nacional de 2020, no ano de 2019, as fontes renováveis corresponderam com 46,2% da oferta interna de energia no país, como é observado na Figura 20 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020). Nesse contexto, é válido considerar que para o Brasil alcançar suas metas de redução de emissões dos conhecidos GEE firmadas pelo Acordo de Paris em 2016, é fundamental um aumento expressivo da participação das fontes de energia renováveis, as quais capturam ou impedem suas emissões. A energia do

biocombustível proveniente de resíduos urbanos se enquadra na categoria “outras renováveis”.

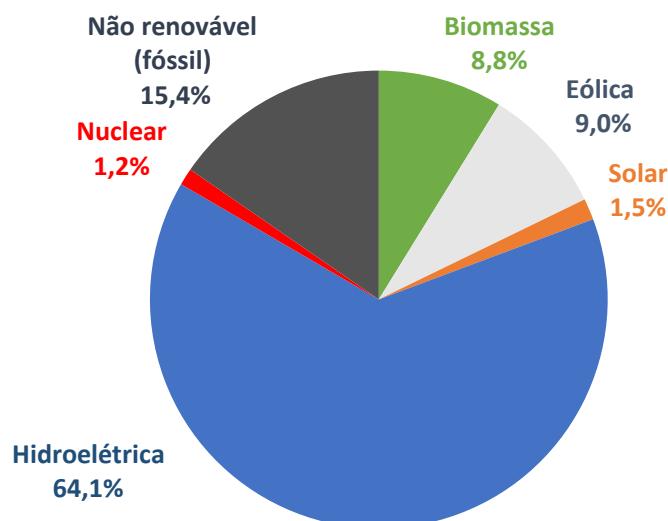
Figura 20 - Gráfico da distribuição da oferta interna de energia



Fonte: (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020)

No que diz respeito exclusivamente a energia elétrica, no Brasil ela é produzida em sua grande maioria a partir de fontes renováveis, com predomínio da geração hidroelétrica, que corresponde aproximadamente com 64% da capacidade total instalada no país, como pode ser visto na Figura 21 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020).

Figura 21 - Gráfico da participação das fontes na capacidade instalada



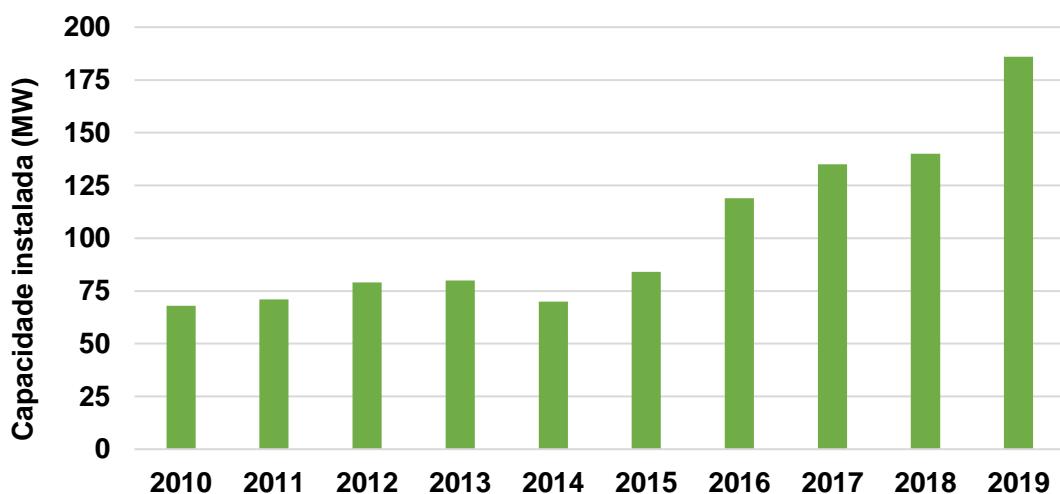
Fonte: (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020)

O predomínio da matriz hídrica, baseado na construção de grandes barragens ao longo de rios caudalosos, oferece uma energia com custos menores em comparação com outras fontes disponíveis. Contudo esse modelo expõe o país a um risco de desabastecimento energético em períodos de estiagem mais prolongados. Em sua grande maioria, instalados em locais longes dos centros consumidores, também intensificam as perdas de cargas inerentes ao processo de transporte da energia (BRASIL; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019).

A manutenção da estabilidade do sistema elétrico nacional passa por medidas como a instalação de fontes alternativas e distribuídas de geração, as quais sendo abastecidas com recursos locais, entregam energia para os consumidores mais próximos. Essa opção diminui as perdas com transporte elétrico, uma vez que reduz a dependência de fontes distantes.

Nesse sentido, o aterro sanitário é configurado tecnicamente como uma fonte estável independente de condições climáticas, com geração previsível de biogás ao longo do tempo, sua utilização também evita a emissão de gases poluentes a atmosfera e causadores do Efeito Estufa (BAGGIO, 2017). O biogás compõe a fração energética pertencente à biomassa, juntamente com fontes como o bagaço de cana de açúcar, o carvão vegetal, a lixívia ou licor negro resultante de processos da indústria de papel e celulose e tantos outros. A Figura 22 mostra a crescente produção de energia elétrica oriunda do biogás desde 2010.

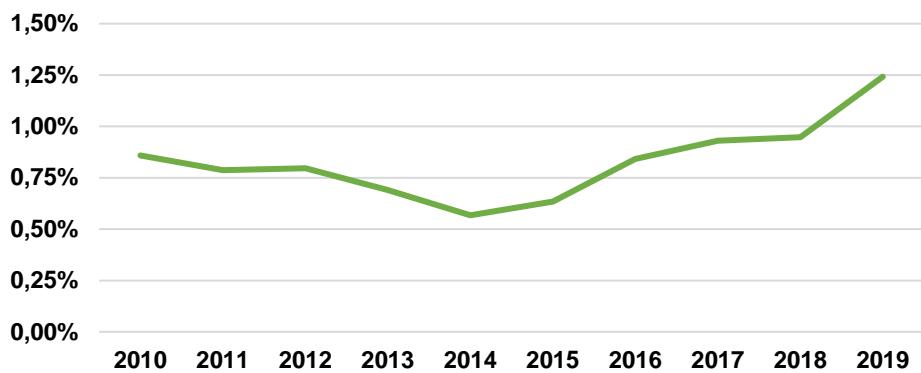
Figura 22 - Capacidade elétrica instalada para produção com biogás (MW)



Fonte: Elaborado pelo autor com base em EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2020)

Complementando essa informação, a Figura 23 ilustra a participação percentual do biogás dentro da fração correspondente à energia produzida advinda de biomassa.

Figura 23 - Percentual de participação do biogás dentro da fração de biomassa



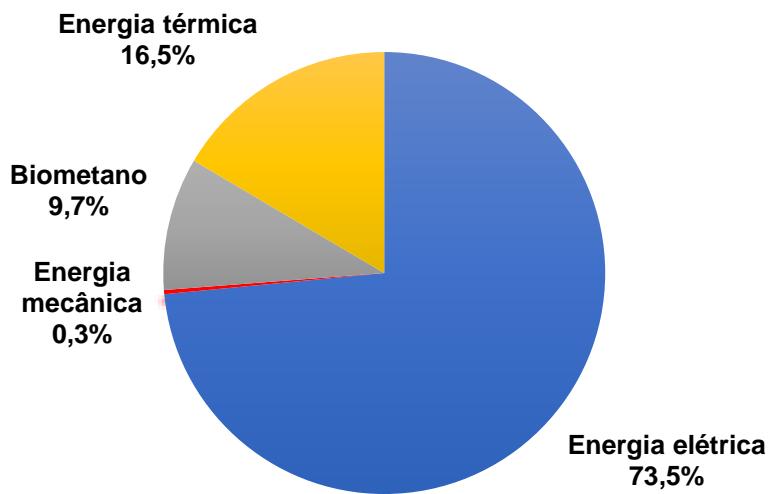
Fonte: Elaborado pelo autor com base em EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2020)

A partir desses dados, observa-se que em 2019 houve o maior aproveitamento histórico de biogás para geração de energia elétrica no Brasil, cuja capacidade total instalada alcançou o percentual de 0,1% da matriz elétrica nacional.

Considerando os valores estimados para a produção de energia elétrica no aterro estudado, o melhor aproveitamento do potencial energético pode ser alcançado com a implantação de uma unidade com capacidade instalada de 3MW. Essa potência equivale a aproximadamente 1,6% do total instalado no Brasil em 2019 que foi de 186MW.

Segundo dados do CIBIOGÁS (2019), para gerar energia elétrica em 2018 foram utilizados cerca de 73% do total de biogás produzido no país, conforme indicado na Figura 24.

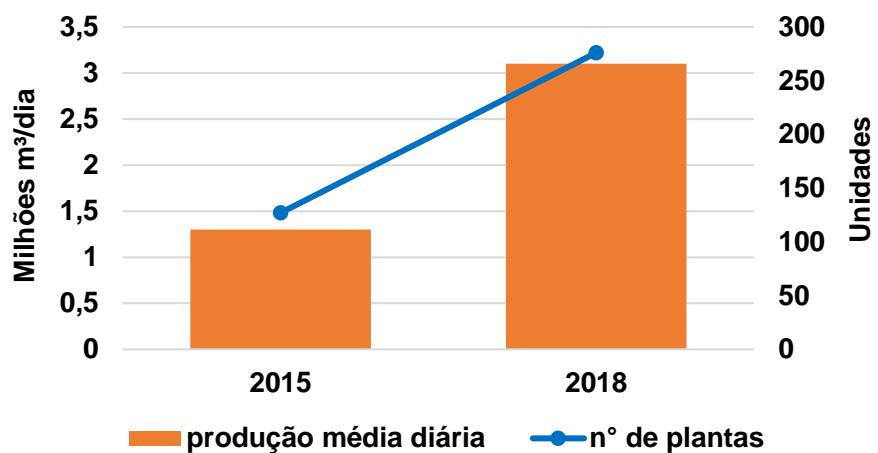
Figura 24 - Aplicação do volume de produção de biogás



Fonte: (CIBIOGÁS, 2019)

Entre 2015 e 2018 houve um aumento de 138% na produção nacional de biogás. O número de plantas produtoras passou de 127 para 276 unidades e o volume médio de produção que era de 1,3 milhões de Nm<sup>3</sup>/dia, chegou a 3,1 milhões de Nm<sup>3</sup>/dia, como mostrado na Figura 25 (CIBIOGÁS, 2019). O potencial de produção de biogás em Cachoeira Paulista para 2023 equivale a 0,53% do que foi produzido em 2018.

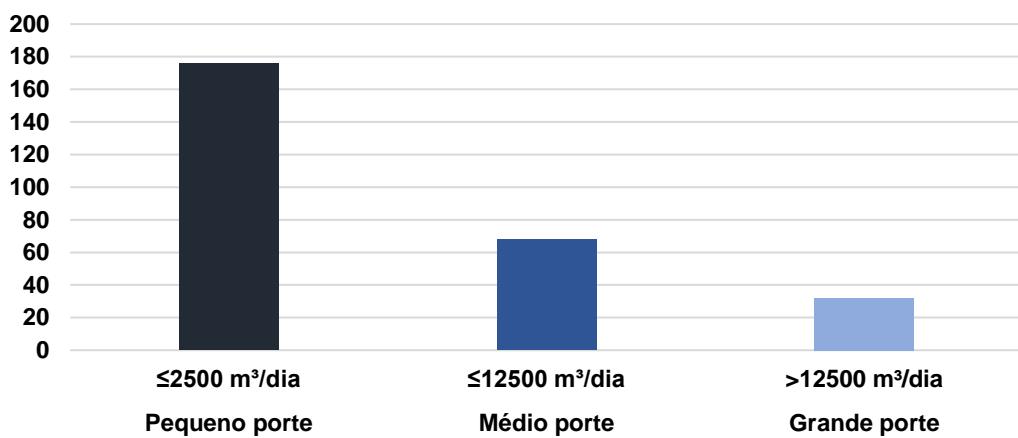
Figura 25 - Evolução da capacidade instalada de aproveitamento de biogás



Fonte: Elaborado pelo autor com base em CIBIOGÁS (2019)

Em 2018, as plantas consideradas de pequeno porte, com operação de até 2.500 Nm<sup>3</sup>/dia de biogás, somavam 176 unidades, produzindo ao todo um volume diário médio de 149.715 Nm<sup>3</sup>. As plantas de médio porte, com operação entre 2.501 Nm<sup>3</sup>/dia e 12.500 Nm<sup>3</sup>/dia totalizaram 68 unidades, apresentando volume diário de 420.916 Nm<sup>3</sup>. E as plantas de grande porte, com produção superior a 12.501 m<sup>3</sup>/dia, contaram com 32 unidades, operando um volume total de 2.540.239 Nm<sup>3</sup>/dia. A Figura 26 expressa o número de unidades agrupadas conforme capacidade de operação.

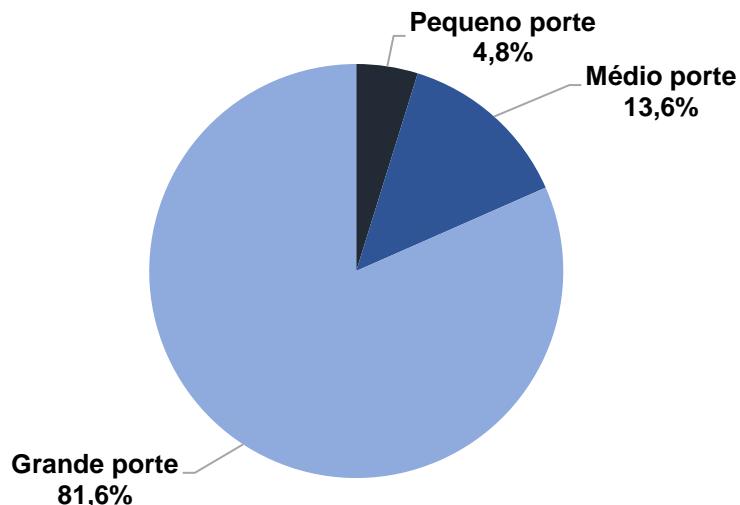
Figura 26 - Número de plantas segundo capacidade de operação



Fonte: Elaborado pelo autor com base em CIBIOGÁS (2019)

A Figura 27 traz o percentual de participação do total de biogás produzido pelas unidades de operação segundo a capacidade de operação.

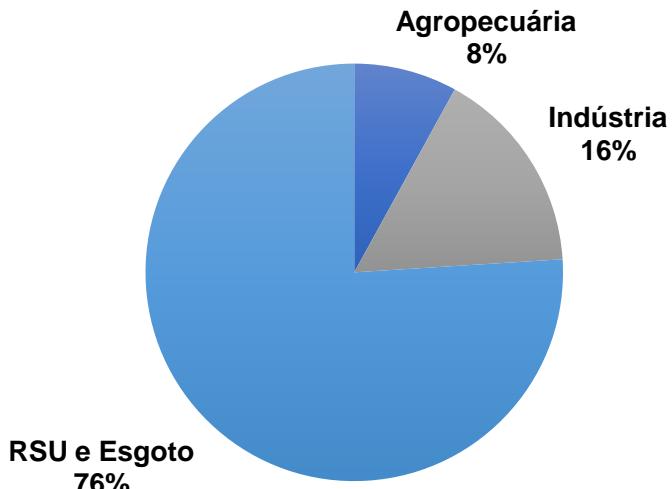
Figura 27 - Percentual de participação das plantas de biogás segundo capacidade de operação



Fonte: (CIBIOGÁS, 2019)

Quanto a origem do biogás 76% do volume total é gerado a partir de RSU ou esgoto urbano, conforme gráfico da Figura 28. Isso se justifica sobretudo pelo maior porte das plantas abastecidas com os gases de aterro sanitário.

Figura 28 - Origem do biogás produzido



Fonte: (CIBIOGÁS, 2019)

A partir dos valores observados na Tabela 7, o aterro de Cachoeira Paulista tem o potencial de operar com um volume de 16.660 m<sup>3</sup>/dia de metano em 2023, podendo chegar a um máximo de 25.614 m<sup>3</sup>/dia em 2035. Isso corresponde a categoria de uma planta de biogás de grande porte a qual poderá abastecer a região do Vale do Paraíba, proporcionando mais estabilidade ao sistema elétrico local.

Um outro comparativo pode ser feito com relação a produção de energia estimada para 2023 e o consumo urbano das cidades da região. Tomando como base Lorena, segundo dados do Ranking Paulista de Energia, em 2018, o município consumiu cerca de 232.770 MWh (SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE, 2019), contando com aproximadamente 89 mil habitantes em 2020 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2021a). Neste caso, a geração de 17.825 MWh seria o equivalente a cerca de 7,5% da demanda de Lorena.

Adotando os mesmos critérios para previsão do volume de gás metano no aterro estudado e a geração de energia elétrica, considerando apenas o resíduo disposto em aterros sanitários no Brasil em 2018 (43,2 milhões de toneladas), até 2020 seriam produzidos 863,7 milhões de m<sup>3</sup> de metano. Com o aproveitamento

padrão de 70%, o volume utilizável seria de 604,6 milhões de m<sup>3</sup>, o que poderia gerar 227 MW de potência disponível. Adotando uma eficiência de 33%, a potência gerada seria de 75MW em 3 anos, oferecendo cerca de 2 milhões de MWh de energia elétrica, o equivalente ao consumo de São José dos Campos e seus 730 mil habitantes (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2021b) no ano de 2018 que foi cerca de 1,8 milhão de MWh (SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE, 2019).

Por fim, ao considerar todo o resíduo gerado em 2018 (72,7 milhões de toneladas), até 2020 seriam produzidos 3,3 milhões de MWh. Isso seria suficiente para abastecer a cidade de Campinas – SP no ano de 2018, com seus 1,2 milhões de habitantes e amplo parque industrial (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2021c). Segundo o Ranking Paulista de Energia, em 2018, o município consumiu cerca de 3,29 milhões de MWh (SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE, 2019).

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos estudos e análises deste trabalho, foi possível compreender a importância da implantação de aterros sanitários como medida fundamental para o estabelecimento de uma sociedade sustentável, não apenas no contexto ambiental, mas também sob aspectos econômicos e energéticos. Foi observado que o aterro de Cachoeira Paulista tem um potencial de produzir, já em 2023, 16.660 m<sup>3</sup> de metano diariamente, podendo gerar 17.825 MWh de energia elétrica. Este montante é capaz de abastecer sozinho uma população de 6,67 mil habitantes, equivalente ao município de Silveiras - SP que em 2020 teve uma população estimada de 6,34 mil pessoas. Além de gerar uma receita bruta de R\$3.565.000,00 com a venda de energia elétrica e R\$665.800,00 com a venda de CBios.

A transformação do biogás de RSU se apresenta como uma estratégia para o aproveitamento econômico dos rejeitos urbanos, de modo a incentivar a adoção de práticas mais adequadas por parte dos administradores, sobretudo os municipais.

Como proposta para trabalhos futuros sugere-se uma análise financeira aprofundada sobre os custos, operacionais e de implantação, e receitas dessa atividade, assim como levantamento com dados reais de emissão de gases no aterro sanitário de Cachoeira Paulista, ou mesmo em outros aterros existentes, para que seja embasada a elaboração do projeto efetivo.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR 10004:2004 - Resíduos sólidos – Classificação**. p. 1–71, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419 - Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. p. 1–7, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Home**. 2021. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/>>. Acesso em: 26 dez. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético**. p. 1-46, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**. 2019.

Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 4 jan. 2020.

ABREU, F. V. DE; COSTA FILHO, M. A. F.; SOUZA, M. C. L. **Biogás De Aterros Sanitários Para Geração De Energia Renovável E Limpa - Um Estudo De Viabilidade**. IX Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, p. 1–8, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL. **Planilha RenovaCalc versão 7.0**. RenovaCalc, 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/renovabio/renovacalc>>. Acesso em: 4 jan. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL (BRASIL). **RESOLUÇÃO Nº 8, DE 30.1.2015: RANP 8 - 2015**, Diário Oficial, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL (BRASIL). **RESOLUÇÃO ANP Nº 685, DE 29.6.2017: RANP 685 - 2017**, Diário Oficial, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIO COMBUSTÍVEL (BRASIL). **RESOLUÇÃO Nº 758, DE 23 DE NOVEMBRO DE 2018**, Diário Oficial,

2018.

ARAÚJO, A. V. DE; FEROLDI, M.; URIO, M. B. **Uso de biogás em máquinas térmicas**. Journal of Agronomic Science, Umuarama, v. 3, n. Especial, p. 274–290, 2014.

BAGGIO, P. L. **Estudo das tecnologias existentes para geração de energia elétrica a partir do biogás**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

BONA, F. S.; RUPPERT FILHO, E. **As microturbinas e a geração distribuída**. 5º Encontro de Energia no Meio Rural, p. 10, 2004.

BOSSLE, R. **Preço do CBio volta a cair e título é negociado, em média, por R\$ 43,73 em novembro**. Disponível em:  
<<https://www.novacana.com/n/industria/financeiro/preco-cbio-volta-cair-titulo-negociado-media-r-43-73-novembro-011220>>. Acesso em: 6 jan. 2021.

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, 2010.

BRASIL. **Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017**. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial, 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Clima**. Brasília - DF, 2020. Disponível em:  
<<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas.html>>. Acesso em: 4 jan. 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano decenal de expansão de energia 2029**. v. 4, n. 1, p. 1–339, 2019.

BRITO, R. A. **Ozonização catalítica do chorume proveniente do aterro sanitário de Cachoeira Paulista - SP na presença de ferro em sistema contínuo**. Lorena - SP: Universidade de São Paulo, 2014.

CANDIANI, G.; SILVA, M. **Análise do Biogás no Aterro Sanitário Caieiras**.

Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 32, n. 1, p. 69–77, 2011.

CANDIANI, G.; VIANA, E. **Emissões fugitivas de metano em aterros sanitários.**

GEOUSP: Espaço e Tempo (Online), v. 21, n. 3, p. 845, 2018.

CARDOSO, L. M.; SOUZA, P. L. DE; SILVA, T. N. **Panorama Operacional e os Desafios da Primeira Usina Termoelétrica Movida a Biogás de Aterro Sanitário do Estado do Rio Grande Do Sul**, p. 1–6, 2019.

CARVALHO, R. Q. et al. **Oportunidades Enterradas**. Vitória - ES: EDUFES, 2019.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual do usuário do programa de computador BIOGÁS**. p. 1–61, 2006.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares 2006**. São Paulo: CETESB, 2007. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 1 dez. 2020

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares 2007**. São Paulo: CETESB, 2008. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 1 dez. 2020

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares 2008**. São Paulo: CETESB, 2009. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 1 dez. 2020

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares 2009**. São Paulo: CETESB, 2010. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 1 dez. 2020

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares 2010**. São Paulo: CETESB, 2011. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 1 dez. 2020

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares 2011**. São Paulo: CETESB, 2012. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 1 dez. 2020

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos 2012**. São Paulo: CETESB, 2013. Disponível em:

<<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 1 dez. 2020

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos 2013**. São Paulo: CETESB, 2014. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 1 dez. 2020

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos 2014**. São Paulo: CETESB, 2015. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 1 dez. 2020

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos 2015**. São Paulo: CETESB, 2016. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 1 dez. 2020

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos 2016**. São Paulo: CETESB, 2017. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 1 dez. 2020

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos 2017**. São Paulo: CETESB, 2018. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 1 dez. 2020

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos 2018**. São Paulo: CETESB, 2019. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 1 dez. 2020

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos 2019**. São Paulo: CETESB, 2020. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 1 dez. 2020

CIBIOGÁS. **Panorama do Biogás no Brasil em 2018**. Disponível em: <[https://rdstation-static.s3.amazonaws.com/cms%2Ffiles%2F54738%2F1552939789NT002.2019-Panorama-do-biogas-2018.pdf?utm\\_campaign=webinar\\_panorama\\_do\\_biogas\\_no\\_brasil\\_em\\_2018\\_-\\_linknota&utm\\_medium=email&utm\\_source=RD+Station](https://rdstation-static.s3.amazonaws.com/cms%2Ffiles%2F54738%2F1552939789NT002.2019-Panorama-do-biogas-2018.pdf?utm_campaign=webinar_panorama_do_biogas_no_brasil_em_2018_-_linknota&utm_medium=email&utm_source=RD+Station)>. Acesso em: 4 jan. 2021.

DELGADO, F.; SOUSA, M. E. DE; ROITMAN, T. **Biocombustíveis**. FGV Energia, v. 4, p. 9–15, 2017.

DURÃO, M.; NEDER, V. **Ministério da Economia defende mercado de comercialização do crédito de carbono**. Disponível em: <<https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,ministerio-da-economia-defende-mercado-de-comercializacao-do-credito-de-carbono,70003370559>>. Acesso em: 23 dez. 2020.

E-GOV; GEOSIAP. **Orçamento - Despesas por Função e SubFunção**. Portal da Transparência, 2020 Disponível em: <[http://187.92.206.250/pmcachoeirapaulista/websis/portal\\_transparencia/financeiro/contas\\_publicas/index.php?consulta=cp\\_o\\_desp\\_funcao\\_subfuncao](http://187.92.206.250/pmcachoeirapaulista/websis/portal_transparencia/financeiro/contas_publicas/index.php?consulta=cp_o_desp_funcao_subfuncao)>. Acesso em: 6 jan. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Publicações - RenovaBio**. 2017. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/renovabio>>. Acesso em: 23 dez. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Quem Somos**. 2004. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/a-epc/quem-somos>>. Acesso em: 26 dez. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2020**. p. 1–192, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Informe: Leilões de Energia Elétrica 2019**. Rio de Janeiro - RJ: [s.n.], 2019. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-451/Informe\\_Leiloes\\_2019\\_v3.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-451/Informe_Leiloes_2019_v3.pdf)>.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Caderno técnico de reabilitação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos**. p. 33, 2010.

FERREIRA, A. L. **Aproveitamento energético do gás de aterro no Brasil**. Portal resíduos sólidos, 2018. Disponível em: <<https://portalresiduossilidos.com/aproveitamento-energetico-do-gas-de-aterro-no-brasil/>>. Acesso em: 3 jan. 2021.

FULLER, M. **O que é e como funciona a precificação de carbono no Brasil**. Capital aberto, 2020. Disponível em: <<https://capitalaberto.com.br/sustentabilidade/o-que-e-e-como-funciona-a-precificacao-de-carbono-no-brasil/>>. Acesso em: 23 dez.

2020.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4<sup>a</sup> edição ed. São Paulo: Atlas S.A, 2002.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Cetesb**. 2020. Disponível em: <<https://www.saopaulo.sp.gov.br/orgaos-e-entidades/empresas/cetesb/>>. Acesso em: 4 jan. 2021.

HIRANO, M. **Geração de energia por microturbina alimentada à biogás em uma propriedade rural: estudo de caso**. [s.l.] UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”, 2015.

HISING, E.; GIMENES, E. **Aterros sanitários, aterros controlados e lixões: entenda o destino do lixo no Paraná. Biogás**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/2017/08/01/aterros-sanitarios-aterros-controlados-e-lixoes-entenda-o-destino-do-lixo-no-parana/>>. Acesso em: 21 dez. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados - Lorena**. 2021a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/lorena.html>>. Acesso em: 12 jan. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados - São José dos Campos**. 2021b. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sao-jose-dos-campos.html>>. Acesso em: 12 jan. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados - Campinas**. 2021c Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/campinas.html>>. Acesso em: 12 jan. 2021.

MACEDO, L. V. **Manual para Aproveitamento de Biogás**. São Paulo - SP: ICLEI, 2009. v. 1-Aterros Sanitários

INDIAMART. **Biogas Engines**. 2020 Disponível em: <<https://www.indiamart.com/proddetail/biogas-engines-19648030891.html>>. Acesso em: 3 jan. 2021.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Relatório de Pesquisa, p. 82, 2012.

ITAIPU. **ITAIPU BINACIONAL - Geração.** Disponível em:

<<https://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>>. Acesso em: 12 jan. 2021.

KRIPKA, R. M. L.; SCHELLER, M. **Pesquisa Documental: considerações sobre conceitos e características na Pesquisa Qualitativa.** ResearchGate, p. 1–4, 2015.

MARQUES, 2018. **Proposta para Elaboração de Um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos para Escola de Engenharia de Lorena - Universidade De São Paulo.** 2018.

MENDONÇA, D. D. S. M.; ZANG, W., A. DA F.; ZANG, J., W. **Efeitos e danos ambientais da disposição de resíduos sólidos na área do lixão e aterro controlado no município de Inhumas-GO.** Caderno de Geografia, v. 27, n. 50, p. 1–499, 2017.

MOREIRA, J. **APLICAÇÕES DA TERMODINÂMICA.** SISEA, 2017. Disponível em: <[www.usp.br/sisea](http://www.usp.br/sisea)>. Acesso em: 4 jan. 2021.

MUZY, G. L. C. DE O. **Subestações Elétricas.** [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

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

OBLADEN, NICOLAU, L.; OBLADEN, NEIVA, T. R.; BARROS, K. R. **Guia para elaboração de projetos de aterros sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos.** 2ª Edição ed. Paraná: CREA-PR, 2009.

PIÑAS, J. A. V. et al. Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: Comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). **Revista Brasileira de Estudos de Populacao**, v. 33, n. 1, p. 175–188, 2016.

PINTO, B. **A Importância dos Sistemas de Drenagem em Aterros Sanitários - Marca Ambiental.** Marca Ambiental, 2019. Disponível em:

<<https://www.marcaambiental.com.br/a-importancia-dos-sistemas-de-drenagem-em-aterros-sanitarios/#:~:text=Drenagem%20de%20chorume%20e%20biog%C3%A1s,o%20t%C3%A9rmino%20da%20vida>>

útil.&text=Dreno de biogás%3A Telas de,e tubos de PEAD perfurados>. Acesso em: 4 jan. 2021.

POSSAMAI, F. P. et al. Lixões inativos na região carbonífera de Santa Catarina: Análise dos riscos à saúde pública e ao meio ambiente. **Ciencia e Saude Coletiva**, v. 12, n. 1, p. 171–179, 2007.

PREFEITURA DE CRUZEIRO. **Prefeitura Municipal de Cruzeiro**. 2020. Disponível em: <<https://www.cruzeiro.sp.gov.br/page/omunicipio.asp>>. Acesso em: 4 jan. 2021.

PARQUE TECNOLÓGICO ITAIPÚ. **Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás**. 2020. Disponível em: <<https://www.pti.org.br/pt-br/cibiogas>>. Acesso em: 6 jan. 2021.

REGATTIERI, C. R. **Quantificação da emissão de biogás em aterro sanitário - estudo de caso do aterro sanitário de São Carlos**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2009.

REGIONAL NEWS. **Você sabe a diferença entre aterro, lixão e aterro controlado?** 2014. Disponível em: <<https://rnews.com.br/voce-sabe-a-diferenca-entre-aterro-lixao-e-aterro-controlado.html>>. Acesso em: 3 jan. 2021.

**SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE**. Ranking Paulista de Energia. 2019. Disponível em: <<http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/Portalcev2/Municipios/ranking/index.html>>. Acesso em: 6 de jan. 2021.

THEOTONIO, L. T. **Recuperação Energética de RSU como ferramenta de desenvolvimento econômico e ambiental**. ProteGEER, 2019. Disponível em: <<http://protegeer.gov.br/biblioteca/apresentacoes/40-workshop-recuperacao-energetica-de-residuos-recife-2019/611-leticia-theotonio-recuperacao-energetica-de-rsu-como-ferramenta-de-desenvolvimento-economico-e-ambiental>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

TOLMASQUIM, M. T. **ENERGIA TERMELÉTRICA: Gás natural, biomassa, carvão, nuclear**. Rio de Janeiro - RJ: EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2016.

UNICA. **MME fortalece o RenovaBio em sua manifestação**. União Nacional da

Bioenergia, 2020. Disponível em:

<<https://www.udop.com.br/noticia/2020/11/12/mme-fortalece-o-renovabio-em-sua-manifestacao.html>>. Acesso em: 4 jan. 2021.

VILHENA, A. **Lixo municipal - manual de gerenciamento integrado**. 4a ed. São Paulo - SP: CEMPRE, 2018.

WORLD BANK GROUP. **State and Trends of Carbon Pricing 2019**. p. 1–99, 2019.