



AVALIAÇÃO DO POTENCIAL METANOGÊNICO DE CHORUME GERADO EM ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES: O CASO DO CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL DO PONTAL DO PARANAPANEMA (CIPP)

EVALUATION OF THE METHANOGENIC POTENTIAL OF LEACH GENERATED IN A HOUSEHOLD SOLID WASTE LANDFILL: THE CASE OF THE INTERMUNICIPAL CONSORTIUM OF PONTAL DO PARANAPANEMA (CIPP)

Maria Cristina Rizk, Felipe Tsuyoshi Isaac Kurihara

Universidade Estadual Paulista – UNESP.

E-mail: mc.rizk@unesp.br, amb.isaac@gmail.com

RESUMO - O chorume é um líquido produzido pela decomposição de resíduos orgânicos e inorgânicos em aterros sanitários e pode poluir o solo e a água subterrânea, bem como representar um risco para a saúde pública se não for gerenciado adequadamente. Neste trabalho, avaliou-se o potencial metanogênico do chorume gerado no aterro do Consórcio Intermunicipal do Pontal do Paranapanema para estimar o volume de biometano produzido a partir do chorume. Posteriormente, avaliou-se ambientalmente e economicamente, a potencial substituição do diesel utilizado pelas frotas de coleta de resíduos dos municípios membros do consórcio, pelo biometano. Os resultados indicam que o biometano supriria 23,2% a demanda por combustível fóssil, provendo economia e uma redução na quantidade de CO₂ emitida na atmosfera. Este estudo demonstrou que o biometano gerado a partir do chorume do aterro pode ser uma importante fonte de geração de energia renovável para o Consórcio Intermunicipal do Pontal do Paranapanema substituir o diesel utilizado pelas frotas de coleta de resíduos pelo biometano.

Palavras-chave: Chorume. Reaproveitamento Energético. Biometano.

ABSTRACT - Leachate is a liquid produced by the decomposition of organic and inorganic waste in landfills and can pollute soil and groundwater, as well as pose a risk to public health if not properly managed. In this work, the methanogenic potential of the leachate generated in the landfill of the Intermunicipal Consortium of Pontal do Paranapanema was evaluated to estimate the volume of biomethane produced from the leachate. Subsequently, an environmental and economic assessment was made of the potential replacement of diesel used by the waste collection fleets of the member municipalities of the consortium with biomethane. The results indicate that biomethane would supply 23.2% of the demand for fossil fuel, providing savings and a reduction in the amount of CO₂ emitted into the atmosphere. This study demonstrated that the biomethane generated from landfill leachate can be an important source of renewable energy generation for the Intermunicipal Consortium of Pontal do Paranapanema to replace the diesel used by the waste collection fleets with biomethane.

Keywords: Leachate. Energy Reuse. Biomethane.

INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas enfrentados no mundo é a destinação incorreta dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Segundo estudos da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2022), a geração brasileira de RSU foi de aproximadamente 82.477.300 t/ano, que equivale a 390 kg/hab/ano. Entretanto, apenas 60,2% do RSU gerado teve uma destinação adequada e seguiu para disposição em aterros sanitários com 46 milhões de toneladas enviadas para esses locais em 2020.

Apesar da disposição em aterros sanitários apresentar vantagens, são gerados subprodutos a partir da degradação física, química e biológica dos resíduos aterrados, como chorume e gases, os quais podem ser nocivos ao meio ambiente (Felici *et al.*, 2013; Fujii *et al.*, 2019).

Conforme explica Pereira *et al.* (2018), a geração de chorume, é um dos fatores que devem ser gerenciados e monitorados em um aterro sanitário. Dessa forma, a produção de chorume e o seu tratamento são considerados um dos grandes problemas no gerenciamento de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, uma vez que a produção de chorume é influenciada por fatores ambientais e de operação do aterro e devido ao fato de o efluente ter elevado potencial poluidor (Felici *et al.*, 2013; Ribeiro; Buss; Menezes, 2015; Gomes; Shoenell, 2018).

Uma das alternativas que proporcionam o reaproveitamento energético do chorume gerado em aterros é o processo de digestão anaeróbia no qual ocorre a decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio, gerando, além do composto orgânico, o biogás. O gás gerado em tais processos pode ser aproveitado para a geração de calor, energia ou combustível veicular como o biometano.

O biometano é uma alternativa sustentável e renovável ao diesel, que é um combustível fóssil altamente poluente e responsável por grande parte das emissões de gases de efeito estufa. Como combustível, o biometano pode abastecer qualquer veículo com kit de gás natural veicular (GNV), com a vantagem de ser renovável, ao contrário do GNV e poder reduzir em até 90% as emissões de poluentes, em comparação com a gasolina, e sua utilização prevenir o lançamento de metano (CH₄) na atmosfera, contribuindo para diminuir o aquecimento global (CIBIOGÁS, 2022).

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa tem como objetivo principal avaliar o potencial metanogênico do chorume proveniente do aterro do CIPP para a produção de biometano e estimar a economia gerada a partir da substituição do diesel das frotas utilizadas para coleta de resíduos sólidos domiciliares (RSD) dos municípios do CIPP pelo biometano gerado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar o volume de chorume gerado ao longo da vida útil do aterro sanitário do CIPP e o volume de biometano a ser produzido a partir do chorume gerado;
- Entender o atual consumo de diesel e os quilômetros rodados pelas frotas de coleta de RSD do CIPP;
- Avaliar tecnicamente e ambientalmente, a substituição do diesel pelo biometano nas frotas.

METODOLOGIA

ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE CHORUME GERADO NO ATERRO SANITÁRIO DO CIPP

Para estimar o volume de chorume gerado ao longo da vida útil do aterro sanitário do CIPP, utilizou-se as informações que constam no Projeto Executivo do Aterro (CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL DO PONTAL DO PARANAPANEMA, PROJECTA ASSESSORIA E CONSULTORIA, 2019).

O volume gerado de chorume em cada trincheira é de:

- Trincheira 1: 4.834,8 m³/ano
- Trincheira 2: 4.834,8 m³/ano
- Trincheira 3: 6.692,4 m³/ano (Consórcio Intermunicipal do Pontal do Paranapanema, Projecta Assessoria e Consultoria, 2019).

Com base na estimativa de vida útil do aterro, as trincheiras teriam a seguinte vida útil:

- Trincheira 1: 5 anos
- Trincheira 2: 6 anos
- Trincheira 3: 6 anos (Consórcio Intermunicipal do Pontal do Paranapanema, Projecta Assessoria e Consultoria, 2019).

Com isso, para a quantificação do volume gerado de chorume ao longo da vida útil do aterro do CIPP, multiplicou-se o volume estimado gerado de chorume por ano em cada trincheira pela vida útil de cada trincheira.

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DO CHORUME GERADO NO ATERRO SANITÁRIO DO CIPP

Para estimar a produção de biogás do chorume gerado no aterro do CIPP, foram coletadas amostras para análises laboratoriais realizadas em um laboratório terceirizado.

A amostra de chorume deu entrada no laboratório no dia 01 de outubro de 2022. O processo de digestão anaeróbia do chorume foi acompanhado semanalmente por meio de análises laboratoriais para mensurar os seguintes parâmetros: Matéria seca (5), umidade (%), matéria orgânica (%), cinzas (%), proteínas (%), lipídios (%), celulose (%), lignina (%), outros carboidratos (%), enxofre total (mg/kg), fósforo total (mg/kg), potássio total (mg/kg), geração de biogás estimada (m³/ton), teor de metano (%), teor de enxofre (ppm) e produtividade de biometano (Nm³/ ton de MO).

O Potencial Bioquímico de Metano (PBM) é o método utilizado para estimar a produção de metano a partir de testes experimentais em escala de bancada. São utilizadas condições ideais de processo para maximizar a produção de gás, apesar de na prática nem sempre as condições são viáveis de ser alcançadas. Algumas associações internacionais padronizaram e certificaram metodologias, como a ISO 11734, ASTM E-2170-01 e VDI 4630. Tal método, segundo o laboratório terceiro, foi utilizado para análise do chorume do aterro.

Com isso, a partir da obtenção dos resultados, estimou-se e quantificou-se a quantidade de biogás e biometano gerada, utilizando como base a planta de biogás de uma usina localizada em Narandiba.

Figura 01. Planta de Biogás em Narandiba.



Fonte: COPERSUCAR, 2021.

Para os cálculos da quantidade de biometano gerado utilizou-se uma eficiência de 90% de produção em escala industrial. Tal eficiência foi repassada pelo laboratório terceiro contratado que informou que em escala laboratorial, a produção de biometano a partir da matéria orgânica presente é de 100% aproximadamente, entretanto, em escala industrial de uma usina, segundo levantamentos do próprio laboratório e confirmadas pela usina de biogás e biometano da região, a eficiência cai para 90%.

Para a quantificação de volume de matéria orgânica disponível para a biodigestão, utilizou-se a equação 1.

Volume de matéria orgânica disponível para biodigestão (m³) = Teor de matéria orgânica (%) *
Volume de chorume (m³) (eq. 1)

Para a quantificação do volume de biometano gerado a partir do volume de matéria orgânica disponível para biodigestão, utilizou-se a equação 2.

Volume estimado de biometano gerado (Nm³) = Fator de Produtividade (Nm³ CH₄/t M.O.) * Volume de matéria orgânica disponível para biodigestão (m³) * Rendimento industrial de biogás numa usina de açúcar e álcool adotada de referência (%) (eq. 2)

ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE DIESEL POR BIOMETANO

LEVANTAMENTO DE CONSUMO DE DIESEL E CUSTOS DAS FROTAS DE COLETA DE RSU

Para análise da potencial substituição de diesel por biometano na frota de coleta dos municípios do CIPP realizou-se um levantamento por meio de solicitação dos dados operacionais da frota de coleta de RSU às Prefeituras Municipais de Pirapozinho, Narandiba, Tarabai e Sandovalina.

LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES E CUSTOS PARA CONVERSÃO E UTILIZAÇÃO DO BIOMETANO COMO COMBUSTÍVEL VEICULAR

A conversão de caminhões movidos a diesel para biometano pode trazer vários benefícios ambientais e econômicos. O biometano é um biocombustível produzido a partir da decomposição de matéria orgânica, como resíduos agrícolas, de alimentos e de esgoto.

Foram levantados no mercado as empresas que fornecem o kit de conversão de motor à diesel para utilização do biogás/biometano. Os kits de conversão variam entre US\$ 10.000,00 a US\$ 30.000,00. Para a presente pesquisa adotou-se o valor de US\$ 10.000,00. Já os custos de manutenção dos motores a biogás e biometano são 8% superiores aos custos de manutenção dos motores a diesel sendo que o custo de manutenção dos caminhões diesel é, em média, R\$ 0,4474/km rodado. De acordo com a o fabricante Scania, um caminhão movido a biogás e biometano consegue rodar 2,47 quilômetros com um metro cúbico de GNV em média (Stuart Filho, 2020).

Para o levantamento do valor do m³ de biogás, realizou-se um levantamento junto a uma usina de açúcar e álcool da região, que produz e comercializa biogás e biometano.

Por fim, após a coleta dos dados e informações, os dados foram tratados e foram comparados, através de uma tabela, os custos do diesel, adicionado aos custos de manutenção dos caminhões compactadores e foi feita a comparação dos mesmos para o biogás/biometano.

Com isso, foi possível analisar economicamente o uso de diesel nas frotas de coleta de RSU e sua possível substituição por biometano.

Além disso, para a realização de uma análise comparativa entre a utilização do diesel e do biometano pelas frotas de coleta de RSU e a avaliação da potencial substituição do combustível fóssil pelo renovável, todos os custos e despesas do cenário diesel e do cenário biometano foram tratados e comparados com base na quilometragem de rodagem do ano fiscal nos municípios do CIPP em 2022.

A partir da comparação de custos e despesas entre o diesel e biometano, avaliou-se em diferentes cenários a possibilidade de inclusão do biometano gerado a partir do chorume do aterro dentro do modal atual e verificou-se a porcentagem de sua representatividade no CIPP como um todo ou atendendo municípios específicos de acordo com a necessidade de combustível para realização das coletas verificadas no levantamento de custos das frotas de coleta.

QUANTIFICAÇÃO EM GCO₂EQ NÃO EMITIDOS PELA SUBSTITUIÇÃO DO DIESEL PELO BIOMETANO

Na presente pesquisa também se avaliou as emissões de CO₂ no cenário 1: Utilizando o combustível convencional (diesel) na frota de coleta de RSU e no cenário 2: Utilizando o biometano nas frotas em substituição ao diesel.

Para estimar a emissão de dióxido de carbono equivalente considerou-se a intensidade de carbono de 3072 gCO₂ eq/L de diesel e 0,18 gCO₂ eq/L biometano, valores estes calculados por Penteadó (2022), por meio das premissas apresentadas no Tabela 1.

Tabela 1. Premissas para estimativa de emissões por tipo de combustível.

	Diesel	Biometano	Unidade
Intensidade de Carbono	86,5	4,84	gCO ₂ .MJ ⁻¹
PCI	42,29	48,25	MJ.kg ⁻¹
Massa específica	0,84	0,00076	kg.L ⁻¹

Fonte: ANP, 2018.

Para o cálculo da quantidade de CO₂ por combustível utilizado, utilizou a intensidade de carbono calculada por Penteado (2022), e a partir do volume de litros de diesel utilizados pelas frotas dos municípios de CIPP, e de biometano em substituição do diesel, foi calculado a quantidade de CO₂ emitida total e realizou-se uma comparação entre o diesel e o biometano.

RESULTADOS

Resultados da biodigestão anaeróbica em escala laboratorial do chorume

No dia 31 de janeiro de 2023, o laboratório da Geo Biogás & Tech de Londrina, encaminhou os resultados da análise do chorume do aterro do CIPP. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados do potencial metanogênico do aterro do CIPP.

Resultado Análise Chorume CIPP	
Entrada laboratório: 01/10/2022	
Matéria seca (%)	1,2
Umidade (%)	98,8
Matéria orgânica (%)	0,6
Teor de metano (%)	55,5
Produtividade (Nm³ CH₄/ton MO)	380

Fonte: GEO BIOGÁS & TECH, 2023.

Analisando os resultados da análise do chorume do aterro do CIPP, observou-se um baixo teor de matéria orgânica nas amostras. Na amostra o teor de matéria orgânica ficou em 0,6%.

Como comparação, segundo a Geo Biogás & Tech, o teor de matéria orgânica da torta de filtro é de aproximadamente de 17,9% e da vinhaça em 0,9%, substratos esses utilizados pela Planta de biogás e biometano da região para produção de biometano.

O teor de matéria orgânica é um fator importante para análise do potencial metanogênico, pois através desse teor, indica-se a porcentagem de matéria orgânica a ser biodigerida no processo de biodigestão anaeróbia para produção de CH₄.

Segundo relatos da usina de biogás estudada e do laboratório da Geo Biogás & Tech, uma das causas para o baixo teor de matéria orgânica encontrado nas análises, ocorre devido a permanência do chorume na lagoa por muito tempo na lagoa sem tratamento adequado e com exposição a condições climáticas do ambiente.

Observou-se que o fator Produtividade do chorume do aterro do CIPP ficou em 380 Nm³ CH₄/t MO. Tal fator é importante, pois através dele, calcula-se a quantidade de biometano gerado por tonelada de MO.

Segundo informações repassadas pela Geo Biogás & Tech, a produtividade da torta de filtro é de 319 Nm³ CH₄/t MO e da vinhaça é 334 Nm³ CH₄/t MO, isso indica que a produtividade do chorume do CIPP é maior que o dos 2 substratos hoje utilizados pela usina.

QUANTIDADE DE CHORUME GERADO NO ATERRO DO CIPP

Após o levantamento e análise do Projeto Executivo do Aterro Sanitário do CIPP (2019), calculou-se o volume de chorume gerado ao longo da vida útil do aterro sanitário. O volume de chorume gerado ao longo da vida útil do aterro é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Volume de chorume gerado ao longo da vida útil do aterro sanitário do CIPP.

Trincheira	Vida útil (anos)	Volume gerado/ano (m ³ /ano)	Volume de chorume total gerado (m ³)
Trincheira 1	5	4.834,80	24.174,00
Trincheira 2	6	4.834,80	29.008,80
Trincheira 3	6	6.692,40	40.154,40
Total	17	16.362,00	93.337,20

Fonte: Os autores.

Ao todo, o volume de chorume gerado no aterro sanitário ao longo de seus 17 anos de vida útil seria de 93.337,20 m³.

QUANTIDADE DE BIOMETANO PRODUZIDO A PARTIR DA BIODIGESTÃO DO CHORUME

Para a quantificação de biometano gerado, utilizou-se o teor de matéria orgânica obtido nas análises realizadas em laboratório terceiro, e a partir da equação 1 e equação 2, determinou-se a quantidade de biometano gerado.

Calculou-se o volume de biometano gerado a partir do volume anual de 4.834,8 m³ que se estende ano a ano desde o 1º ano até o 11º ano da vida útil do aterro do CIPP. O volume de biometano gerado foi de 10.225,80 Nm³.

Para a geração de biometano por ano na Trincheira 3, utilizou-se a estimativa de volume de chorume gerado de 6.692,40 m³ por ano. Sendo assim, a geração de biometano 13.731,30 Nm³ de biometano do 12º ao 17º ano foi de 13.731,30 Nm³.

Com isso, observa-se pela Tabela 3, o volume de biometano gerado por ano no aterro, que ao final de sua vida útil é de 188.871,60 Nm³.

Tabela 4. Volume de biometano produzido por ano.

Trincheira	Anos	Volume de chorume gerado (m ³)	Volume de biometano (m ³)
1	1 - 5	24.174,00	51.129,00
2	6 - 11	29.008,80	61.354,80
3	12 - 17	40.154,40	82.387,8
Total		93.337,20	194.871,60

Fonte: Os autores.

DADOS DE CONSUMO DE DIESEL E CUSTOS DA FROTA DE COLETA DE RSU

Para a coleta de informações de despesas e dados das frotas de coleta de RSU dos municípios que compõe o consórcio do CIPP no ano de 2022, foram realizados contatos via e-mail e telefônico com as Secretária de Finanças dos municípios. Tais despesas são importantes para realização da análise econômica e ambiental da utilização do biometano pelo diesel. As informações coletadas podem ser observadas na Tabela 5.

Tabela 5. Consumo e custos das frotas de coleta de RSD dos municípios do CIPP em 2022.

Município	KM rodado	Litros de Diesel (L)	Custo Diesel (R\$)
Narandiba	19.104	7.413,86	49.655,86
Sandovalina	12.416	4.966,40	34.284,97
Pirapozinho	64.324	15.997,30	104.639,22
Tarabai	12.705	5.067,19	34.284,99
Total Ano	108.549	33.444,85	222.865,04

Fonte: Os autores

ESTIMATIVA CUSTOS DE MANUTENÇÃO DO MOTOR A DIESEL E A BIOGÁS E BIOMETANO

De acordo com Studart Filho (2020), os custos de manutenção dos motores a biogás e biometano são 8% superiores aos custos de manutenção dos motores a diesel e o custo de manutenção dos caminhões diesel é, em média R\$ 0,4474/km rodado.

Sendo assim, a Tabela 6 apresenta o custo de manutenção de cada veículo da frota separados por municípios e os custos de manutenção dos mesmos, caso fossem convertidos em biogás (custos 8% superiores).

Tabela 6. Custos de manutenção para o consumo de diesel e no cenário de consumo de biometano.

Município	Km rodado	Custos de Manutenção Diesel	Custos de Manutenção Biogás/Biometano
Narandiba	19.104	R\$ 8.547,13	R\$ 9.230,90
Sandovalina	12.416	R\$ 5.554,91	R\$ 5.999,31
Pirapozinho	64.324	R\$ 28.778,55	R\$ 31.080,84
Tarabai	12.705	R\$ 5.684,21	R\$ 6.138,94
Total Ano	108.549	R\$ 48.561,80	R\$ 52.449,99

Fonte: Os autores.

LEVANTAMENTO DO CONSUMO DO MOTOR A BIOGÁS

Segundo o fabricante Scania, um caminhão movido a biogás e biometano consegue rodar 2,47 quilômetros com um metro cúbico de GNV em média (Stuart Filho, 2020).

Sendo assim, a Tabela 7 apresenta a comparação entre a quantidade estimada de biometano necessária para as frotas de coleta rodarem com base no levantamento do ano de 2022 e o consumo de diesel no mesmo ano.

Tabela 7. Volume de diesel consumido pelas frotas de coleta de RSU em 2022 e volume de biometano necessário para suprir a demanda.

Município	KM rodado	Biometano Necessário (Nm3)	Diesel Consumido (L)
Narandiba	19.104	7.734,41	7.413,86
Sandovalina	12.416	5.026,72	4.966,40
Pirapozinho	64.324	26.042,10	15.997,3
Tarabai	12.705	5.143,72	5.067,19
Total Ano	108.549	43.946,95	33.444,75

Fonte: AUTOR, 2023.

ANÁLISE DO POTENCIAL SUBSTITUTIVO DO DIESEL PELO BIOMETANO

Após o levantamento dos custos e consumo de diesel da frota de coleta de RSU dos municípios do CIPP no ano de 2022 e o volume de biometano necessário para suprir a demanda de combustível de acordo com a quilometragem rodada em 2022, realizou uma análise comparativa.

Segundo a usina de biogás e biometano localizada em Narandiba, que produz e comercializa biogás e biometano na região, o preço médio comercializado pelo m³ do biometano no ano de 2022 foi de R\$ 2,17. Com isso, o custo total de biocombustível seria de R\$ 95.364,88

De acordo com Stuart Filho (2020), valor de conversão do motor para biogás é US\$ 10.000,00. Considerando que ao todo foram utilizados 7 veículos pelos municípios do CIPP para realização da coleta de RSU, ao todo, o custo de investimento para conversão dos caminhões seria de 70 US\$ 70.000,00.

Segundo o Banco Central do Brasil (2023), o dólar americano fechou 2022 em \$ 5,16, sendo assim o investimento total para conversão dos veículos de coleta de RSU ficaria R\$ 361.200,00.

A partir disso, a Tabela 8 apresenta os custos totais do cenário a diesel e do cenário do biometano e o investimento necessário para conversão das frotas.

Tabela 8. Custos do diesel e do biometano para coleta de RSU e investimento para conversão.

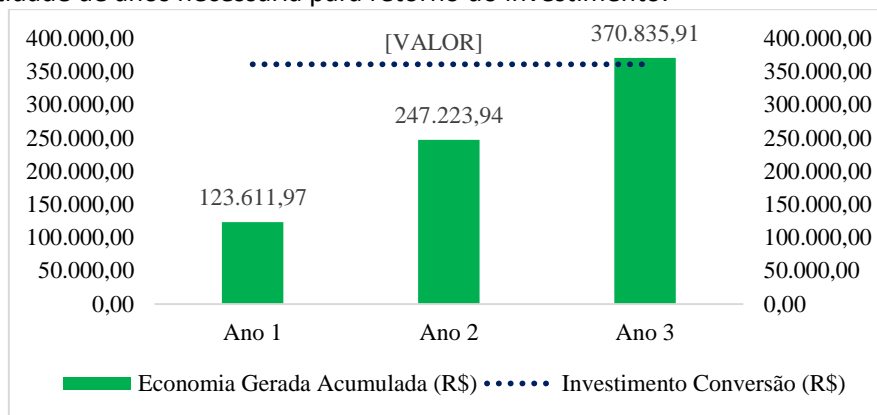
	Diesel	Biometano
Custos Combustível	R\$ 222.865,04	R\$ 95.364,88
Custos Manutenção	R\$ 48.561,80	R\$ 52.449,99
Custo Total	R\$ 271.426,84	R\$ 147.814,87
Investimento Conversão	-	R\$ 361.200,00

Fonte: Os autores.

A partir do levantamento dos dados de custos de diesel e biometano e o investimento necessário para conversão, observou-se que a economia gerada utilizando o biometano como biocombustível em relação ao diesel seria de R\$ 123.611,97 por ano.

Sendo assim, o tempo necessário para o retorno do investimento na conversão dos veículos seria de 3 anos considerando um volume necessário de 43.946,95 m³ de biometano.

O Gráfico 1 apresenta a quantidade de anos necessária para retorno do investimento na conversão.

Gráfico 1. Quantidade de anos necessária para retorno do investimento.

Fonte: Os autores.

Entretanto, conforme apresentado na Tabela 3, o volume de biometano gerado nos primeiros 11 anos do aterro do CIPP seria de 10.225,80 por ano e 13.731,30 por ano a partir do 12º ano.

Sendo assim, tendo em vista que a demanda por biometano por ano seria de 43.946,95 e os volumes possíveis gerados seriam de 10.225,80 e 13.731,30, a demanda seria suprida apenas em 23,3% por ano nos 11 primeiros anos e 31,2% por ano nos últimos 6 anos.

Contudo, mesmo que o potencial volume de biometano não supra a demanda total necessária pelas frotas de coleta de RSU para operação, ele pode substituir uma parcela do diesel consumido por ano. Com isso, tendo em vista que cada m³ de biometano conseguiria rodar por 2,47 km, os volumes de biometano de 10.225,80 e 13.731,30, conseguiriam operar as frotas de coleta dos municípios em 25.257,72 km por ano até o 11º ano e 33.916,31 km nos últimos 6 anos.

A partir disso, foi possível avaliar a quilometragem necessária para operação da coleta de RSU, a quilometragem suprida pelo biometano e a quilometragem de diesel restante para realização das coletas conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9. Cenários anuais de inclusão do biometano na coleta de RSU.

Anos	Km para operação	Km suprido pelo biometano	Km utilizando diesel
1 - 11	108.549	277.257,72	916.204,08
12 - 17	108.549	203.497,86	447.796,14
Total	1.845.282	481.332,78	1.364.000,22

Fonte: Os autores.

Com o levantamento da quilometragem a ser rodada pelo biometano e pelo diesel, avaliou-se os custos para a realização da operação de coleta de RSU pelas frotas dos municípios do CIPP.

As premissas adotadas para estimativa de custos neste cenário foram similares as utilizadas anteriormente, sendo o preço do biometano a R\$ 2,17, os custos de manutenção dos motores a biogás e biometano 8% superiores aos custos de manutenção dos motores a diesel sendo que o custo de manutenção dos caminhões diesel é, em média R\$ 0,4474/km rodado, o custo de manutenção dos motores a biogás seria de 0,05155/km rodado.

Para o preço do Diesel adotou-se o valor médio do Diesel S-10 no ano de 2022 de R\$ 6,69 por litro (ANP, 2023). O fator Km/L utilizado foi baseado na média levantada dos 4 municípios do CIPP que foi de 2,94 Km/L. Sendo assim, a quantidade de litros de diesel necessária por ano seria de 28.330,36 litros do ano 1 ao ano 11 e de 25.375,26 do ano 12 ao ano 17 do aterro.

O Tabela 9 apresenta os custos referentes a utilização do biometano e do diesel por ano.

Tabela 9. Custos referentes a utilização de diesel e biometano.

AnoS	Custos Combustível Biometano	Custos Combustível Diesel	Custos Manutenção Biometano	Custos Manutenção Diesel
1 - 11	R\$ 244.089,78	R\$ 2.084.831,10	R\$ 143.232,43	R\$ 409.909,61
12 - 17	R\$ 178.781,52	R\$ 1.018.562,88	R\$ 104.813,82	R\$ 200.343,96
Total	R\$ 422.871,30	R\$ 3.103.393,98	R\$ 248.046,25	R\$ 610.253,57

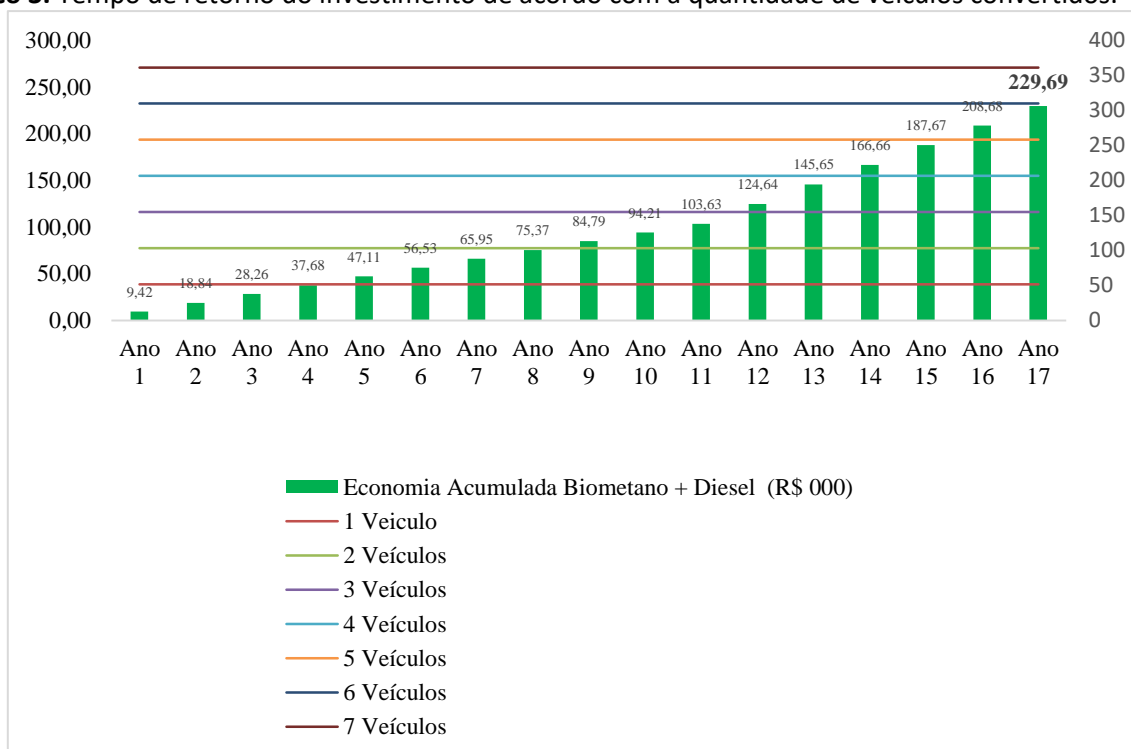
Fonte: Os autores.

Considerando que o custo anual estimado de 2022 utilizando diesel nas frotas foi de R\$ 271.426,84, em 17 anos esse valor chegaria a R\$ 4.614.256,28. Segundo dados levantados conforme apresentado no Quadro 15, os custos ao longo de 17 anos utilizando o biometano e o diesel seria de R\$ 4.384.565,10, com isso observa-se que o cenário com biometano e diesel geraria uma economia para o CIPP de R\$ 229.691,18.

Analisando anualmente a economia gerada entre os 2 cenários, observa-se que do ano 1 ao ano 11, o cenário biometano + diesel geraria uma economia de R\$ 9.421,12 por ano enquanto do ano 11 ao ano 17 geraria por ano uma economia de R\$ 21.009,81.

Por fim, para análise do investimento necessário para conversão das frotas, para esse cenário de diesel + biometano, avaliou-se não ter a necessidade de aquisição de kit's de conversão para os 7 caminhões do CIPP tendo em vista que o volume de biometano gerado por ano a partir do chorume não supriria toda a demanda necessária para operação de 100% da coleta de RSU por caminhões a biometano.

Sendo assim, a Tabela 10 apresenta o tempo de retorno do investimento de acordo com a quantidade de veículos convertidos, considerando que o custo para conversão de cada veículo é de R\$ 51.600.

Gráfico 3. Tempo de retorno do investimento de acordo com a quantidade de veículos convertidos.

Fonte: Os autores.

Com tais resultados, cabe ao CIPP, analisar e avaliar, de acordo com a demanda por combustível do consócio e de cada município, quantos veículos compensa realizar a conversão, tendo em vista que o biometano gerado pelo CIPP não supri toda a demanda por biometano necessária para operação de 100% das frotas de coleta de RSU.

QUANTIFICAÇÃO EM GCO2EQ NÃO EMITIDOS PELA SUBSTITUIÇÃO DO DIESEL PELO BIOMETANO

Para estimar a emissão de dióxido de carbono equivalente considerou-se a intensidade de carbono de 3072 gCO₂ eq/L de diesel e 0,18 gCO₂ eq/L biometano, valores estes calculados por Penteadó (2022). Para o biometano, converteu-se o volume de m³ para Litros.

A Tabela 10 apresenta a quantidade de gCO₂ eq emitida pelo volume de diesel utilizado pelos veículos de coleta de RSU do CIPP em relação ao volume de biometano necessário para suprir toda demanda do CIPP.

Tabela 10. Quantidade de gCO₂ eq emitida pelo volume de diesel utilizado pelos veículos de coleta de RSU do CIPP em relação ao volume de biometano necessário para suprir a demanda.

Município	Biometano Necessário (L)	gCO ₂ eq/L Emitidos Biometano	Diesel Consumido (L)	gCO ₂ eq/L Emitidos Diesel
Narandiba	7.734.410,00	1.392.193,80	7.413,86	22.775.377,92
Sandovalina	5.026.720,00	904.809,60	4.966,40	15.256.780,8
Pirapozinho	26.042.100,00	4.687.578,00	15.997,3	49.143.705,60
Tarabai	5.143.720,00	925.869,60	5.067,19	15.566.407,68
Total Ano	43.946.950,00	7.910.451,00	33.444,75	102.742.272,00

Fonte: Os autores.

Nota-se um aumento em até 13 vezes de emissões de gCO₂ eq na utilização do diesel como combustível ao invés do biometano, ou seja, se os municípios do CIPP utilizassem biometano para rodagem de suas frotas de coleta de RSU, emitiriam 91.831.821,00 gCO₂ eq a menos.

Entretanto, o volume de biometano a partir do chorume do aterro do CIPP é de 10.225,80 por ano nos 11 primeiros anos e 13.731,30 por ano nos últimos 6 anos, com isso, no cenário atual e inserindo o

volume de biometano gerado juntamente com o diesel, a quantidade de gCO₂ eq emitida ao longo dos 17 anos de vida útil do aterro é apresentada no Quadro 20.

Tabela 10. volume de biometano a partir do chorume do aterro do CIPP no cenário biometano + diesel durante 17 anos.

Anos	Biometano Necessário (L)	gCO ₂ eq/L Emitidos Biometano	Diesel Consumido (L)	gCO ₂ eq/L Emitidos Diesel
1 - 11	112.438.800,00	20.238.984	311.633,96	955.339.525,12
12 - 17	82.387.800,00	14.829.804	152.251,56	467.716.792,32
Total	194.826.600,00	35.068.788,00	33.444,75	1.423.056.317,43

Fonte: Os autores.

Sendo assim, a quantidade de gCO₂ eq emitida pelo cenário biometano + diesel durante 17 anos seria de 1.458.125.105,43 gCO₂ eq.

Realizando uma comparação entre a quantidade de gCO₂ eq emitidas pelos cenários: Diesel 100%, Biometano 100% e Biometano + Diesel ao longo de 17 anos, a Tabela 11 apresenta os seguintes resultados:

Tabela 11. Quantidade de gCO₂ eq emitidas pelos cenários: Diesel 100%, Biometano 100% e Biometano + Diesel ao longo de 17 anos.

	Biometano 100%	Diesel 100%	Biometano + Diesel
gCO₂eq	134.477.667,00	1.746.618.624,00	1.458.125.105,43

Fonte: Os autores.

A partir a Tabela 11, podemos concluir que o cenário incluindo o volume biometano gerado pelo chorume do aterro do CIPP somado ao volume de diesel necessário para atender toda a demanda das frotas de coleta de RSU emitiria 288.493.518,57 gCO₂ eq a menos em relação ao cenário utilizando apenas diesel ao longo de 17 anos, ou seja, 16.970.206,97 gCO₂ eq a menos por ano.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de biometano a partir de substratos renováveis é uma das formas mais promissoras de produzir um combustível limpo e sustentável para substituir combustíveis fósseis. Um exemplo é a utilização do chorume para produção de biometano é uma forma de aproveitar esse resíduo e transformá-lo em uma fonte de energia renovável, reduzindo os impactos ambientais negativos associados à disposição inadequada de resíduos orgânicos.

O chorume gerado no aterro do CIPP se mostrou um potencial substrato para produção de biometano apresentando um teor de matéria orgânica de 0,6% e produtividade de 380 Nm³ CH₄/ TON MO. O seu reaproveitamento para recuperação energética ao invés do descarte, poderia gerar uma economia no consumo de diesel pelas frotas de coleta de RSU, além da redução na emissão de CO₂eq na atmosfera.

A presença de uma usina de biogás e biometano próxima ao aterro facilitaria logisticamente, economicamente e tecnologicamente, o envio do chorume para produção de biometano sem a necessidade de altos investimentos em tecnologia e estrutura para biodigestão anaeróbia do resíduo pelo próprio consórcio.

Em relação aos custos, o biometano apresenta um custo de manutenção um pouco mais elevado em relação ao diesel, porém, em custos de combustível, se mostra uma alternativa mais econômica. Entretanto é necessário o investimento em kit's de conversão, porém, caso o CIPP substitua todo o diesel pelo biometano, o tempo de retorno seria 3 anos do investimento.

Por conta do volume de biometano gerado a partir do chorume não suprir toda a demanda necessária para substituição completa, não se mostra viável a aquisição de 7 kit's de conversão tendo em vista que o tempo de retorno do investimento na conversão de 1 veículo ser em 4 anos aproximadamente.

Portanto, a escolha entre o uso de diesel e biometano pelas frotas de coleta de resíduos nos municípios do CIPP pode depender de fatores, como impactos ambientais e disponibilidade de recursos financeiros para conversão dos veículos de coleta de RSU. No entanto, considerando a necessidade de

reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade, o uso do biometano é uma alternativa mais vantajosa do que o diesel.

REFERÊNCIAS

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2022**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 09 mar. 2023.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 758 de 23 de novembro de 2018**. Regulamenta a certificação da produção ou importação eficiente de biocombustíveis de que trata o art. 18 da Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e o credenciamento de firmas **inspetoras**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-audiencia-publica/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cap-10-2018/resolucaoanp-758-2018.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2022.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. **Dados Estatísticos**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos>. Acesso em: 7 dez. 2022.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Cotações e Boletins**, 2023. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/historicocotacoes>. Acesso em: 5 abr. 2023.

CIBIOGÁS - CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Biogás é rota para descarbonizar transportes**. Disponível em: <https://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/biogas-e-rota-para-descarbonizar-transportes/20220224-093147-j876>. Acesso em: 20 out. 2022.

CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL DO PONTAL DO PARANAPANEMA; PROJECTA ASSESSORIA E CONSULTORIA. **Projeto Executivo Aterro Sanitário. Pirapozinho: CIPP; Lucélia: Projecta Assessoria e Consultoria**, 2019. v. 1. Memorial Descritivo e Memorial de Cálculo. Disponível em: <http://www.narandiba.sp.gov.br/site/wpcontent/uploads/2019/05/PROJETO-EXECUTIVO-29.01.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2022

FELICI, E. M. *et al.* Remoção de carga orgânica recalcitrante de lixiviado de resíduos sólidos urbanos pré-tratados biologicamente por coagulação química-floculação-sedimentação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 177-184, abr./jun., 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000200010>

FUJII, E. H. *et al.* Composição granulométrica do filtro ascendente para pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 24. n. 3, p. 525-535, maio/jun. 2019. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1413-41522019185213>

GOMES, L.P.; SHOENELL, E.K. Aplicação de ozônio e de ozônio + peróxido de hidrogênio para remoção de compostos recalcitrantes em lixiviados de aterros sanitários. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, jan./fev. 2018. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1413-41522018155758>.

PENTEADO, M. C. **Cenários para produção de biometano a partir de resíduos do setor sucroenergético paranaense**. 2022. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/bitstream/handle/123456789/6805/Cen%3%a1rios%20para%20Produ%3%a7%3%a3o%20de%20Biometano%20a%20partir%20de%20Res%3%adduos%20do%20Setor%20Sucroenerg%3%a9tico%20Paranaense?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 5 dez. 2022.

PEREIRA, S. S. A problemática dos resíduos sólidos urbanos e os instrumentos de gestão do meio ambiente na cidade de Campina Grande/PB. **Âmbito Jurídico**, Rio Grande, XIV, n. 93, out. 2011. Disponível em:

http://www.ambitojuridico.com.br/site/index.php?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=10535. Acesso em: 04 dez. 2022.

RIBEIRO, E.F.; BUSS, M.V.; MENEZES, J.C.S. S. Tratamento de chorume de aterro de resíduos sólidos urbanos utilizando um coagulante à base de tanino, tratamento biológico e ozonização. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, v. 2, n. 2, p. 37-42, 2015. DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v2n2p37-42>

STUDART FILHO, R. S. **Viabilidade econômica do uso de biogás de aterro sanitário para abastecimento de veículos pesados**. 2020. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, PO, 2020. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/133350/1/Filho_2021.pdf. Acesso em: 5 dez. 2022.