

ABEL ALVES DE SOUZA

ESTUDO DE CASO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM BIOGÁS NO
ATERRO MUNICIPAL DE CASCAVEL – PR

CASCAVEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2020

ABEL ALVES DE SOUZA

**ESTUDO DE CASO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM BIOGÁS NO ATERRO
MUNICIPAL DE CASCAVEL – PR**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Reinaldo Aparecido Bariccatti

Coorientador: Samuel Nelson Melegari de Souza

CASCAVEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2020

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

Souza, Abel Alves de
ESTUDO DE CASO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM BIOGÁS NO
ATERRO MUNICIPAL DE CASCAVEL - PR / Abel Alves de Souza;
orientador(a), Reinaldo Aparecido Bariccatti;
coorientador(a), Samuel Nelson Melegari de Souza, 2020.
58 f.

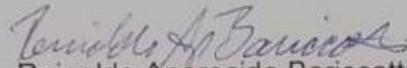
Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, 2020.

1. sustentabilidade. 2. biocombustíveis. 3. biogás de aterro sanitário. 4. geração de energia elétrica com biogás. I. Bariccatti, Reinaldo Aparecido. II. Souza, Samuel Nelson Melegari de. III. Título.

ABEL ALVES DE SOUZA

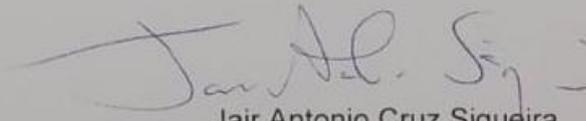
Estudo de caso de geração distribuída com biogás no aterro municipal de Cascavel-PR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Biocombustíveis, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



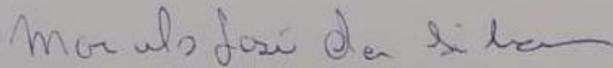
Orientador(a) - Reinaldo Aparecido Bariccatti

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



Jair Antonio Cruz Siqueira

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



Marcelo José da Silva

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Cascavel, 13 de fevereiro de 2020

*“Louvado seja o nome de Deus
para todo o sempre
a sabedoria e o poder a ele pertencem.”*

AGRADECIMENTOS

Agradecido pelo conhecimento e forças que Deus me deu.

À esposa Paola de Medeiros Souza pelo apoio e compreensão.

À família pela ausência, mas confiante que eu venceria.

Aos companheiros de laboratório, sem eles seria mais difícil.

Ao orientador Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti e coorientador Samuel Nelson Melegari de Souza pelos conhecimentos a mim confiados.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, Brasil, pelo financiamento deste estudo.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná por apoiar este trabalho por meio do salário docente e pelo oferecimento do Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	10
2. Revisão Bibliográfica	12
2.1. Biogás de aterro sanitário	12
2.1.1. Panorama atual do lixo no Brasil	13
2.1.2. Biodegradação de RSU no aterro sanitário	13
2.1.3. Conversão do RSU em biogás.....	17
2.1.4. Células de depósito de RSU	17
2.1.5. Coleta e gestão de resíduos	18
2.2. Agentes Poluidores do Biogás	19
2.2.1. Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S) no biogás.....	19
2.2.2. Dióxido de carbono (CO ₂) no biogás	20
2.2.3. Demais traços poluidores do biogás.....	20
2.2.4. Índice de Wobbe.....	21
2.2.5. Geração Distribuída de energia	21
2.2.6. Mecanismos de conversão energética do biogás.....	22
2.2.6.1. Turbinas e microturbinas	22
2.2.6.2. Biogás em motores de combustão interna	23
2.2.6.3. Biogás em motores ciclo Otto	24
2.2.6.4. Emissão de poluentes na geração de energia com biogás	25
3. Material e Métodos	26
3.1. Tratamento do resíduo sólido urbano	27
3.2. Coleta do biogás.....	28
3.3. Mini geração de energia elétrica	29
3.4. Parâmetros monitorados	31
3.5. Teste na escala de potência	33
3.6. Equações utilizadas para cálculos de performance dos grupo geradores	33
3.7. Análise dos gases de exaustão	35
3.8. Equações para avaliação econômica.....	36
4. Resultados e Discussão.....	38
4.1. Monitoramento da qualidade do biogás de aterro.....	38
4.2. Poder calorífico inferior do biogás de aterro	39
4.3. Consumo global e específico das unidades geradoras de energia.....	40
4.4. Eficiência de conversão de biogás em energia através dos grupos geradores	42
4.5. Emissão de NO _x	43
4.6. Temperatura dos gases de escape	46
4.7. Emissão de CO.....	46
4.8. Emissão de SO ₂	47
4.9. Avaliação econômica da conversão do biogás de aterro em energia.....	49
5. Conclusão	51
6. Referências Bibliográficas.....	52

FIGURAS

FIGURA 1. Características de biodegradação do material dentro do aterro sanitário por fases.....	16
FIGURA 2. Microturbina modelo CR30 do fabricante Capstone	23
FIGURA 3. Esquema de tratamento do aterro sanitário	27
FIGURA 4. Duto vertical para escoamento do biogás.	28
FIGURA 5. Captura do biogás e chorume gerados no montante do aterro.....	29
FIGURA 6. Grupo geradores em estudo.	30
FIGURA 7. Fluxograma da energia gerada e exportada para a rede.....	33
FIGURA 8. Consumo de biogás e consumo específico no grupo gerador 1.....	41
FIGURA 9. Consumo de biogás e consumo específico no grupo gerador 2.....	41
FIGURA 10. Comparativo de emissão de NO _x pelos grupo geradores 1 e 2, quando gerando potência de energia elétrica.	44
FIGURA 11. Temperatura dos gases de escape dos dois grupos geradores em estudo.....	46
FIGURA 12. Comportamento da emissão de CO dos dois grupos geradores estudados.....	47
FIGURA 13. Emissão de SO ₂ pelos dois grupos geradores.	48

TABELAS

Tabela 1. Monitoramento do biogás, energia elétrica e meio ambiente	31
Tabela 2. Especificação técnica da instrumentação utilizada.	31
Tabela 3. Especificações técnicas do analisador de gases de exaustão.....	36
Tabela 4. Proporção média do biogás estudado.....	38
Tabela 5. Dados obtidos nos ensaios dos geradores 1 e 2.....	39
Tabela 6. Eficiência global energética dos grupo geradores 1 e 2.....	43
Tabela 7. Eficiência energética dos motores acoplados aos geradores 1 e 2 em faixas de potência.....	43
Tabela 8. Descrição dos itens do projeto e seu valor de investimento para implementação do sistema de geração distribuída.....	49
Tabela 9. Descrição dos custos mensais para plena execução do sistema.....	49
Tabela 10. Avaliação econômica da implementação do investimento	50

Souza, Abel Alves de. Unioeste, fevereiro – 2020
**ESTUDO DE CASO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM BIOGÁS NO ATERRO
MUNICIPAL DE CASCAVEL – PR**
. Reinaldo Aparecido Bariccatti.

RESUMO

Dada a necessidade de desenvolvimento sócioeconômico da economia mundial, torna-se necessário adotar práticas sustentáveis, mitigando possíveis impactos ambientais causados por resíduos, valorizando economicamente estes últimos. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial energético de uma unidade geradora de eletricidade conectada à rede, que utiliza o biogás de aterro sanitário como combustível. O estudo foi realizado no aterro sanitário da cidade de Cascavel, Paraná, com uma população de cerca de 300.000 habitantes, que produz cerca de 280 toneladas de resíduos sólidos urbanos diariamente. Para tanto, foram utilizados equipamentos para medir o consumo de combustível, a potência gerada e ainda a emissão de poluentes pelos gases de exaustão. Equações matemáticas possibilitaram a obtenção da eficiência de conversão do grupo gerador e também a análise de viabilidade econômica. Com base na verificação da qualidade do biogás in natura, obteve-se proporção de metano (CH₄) e conseqüentemente seu poder calorífico inferior (PCI) do biogás utilizado no teste, com valor médio de 6,15 kWh.m⁻³ para o grupo gerador 1 e 6,17 kWh.m⁻³ para o grupo gerador 2, com eficiências respectivas de 17,95% para potência de 70 kWh e 19,13% para potência de 65 kWh, com percentagens médias de metano de 59,8% para o grupo gerador 1 e 60,3% para o grupo gerador 2. O biogás utilizado teve apenas a remoção de umidade por condensação, atingindo baixos valores de H₂S (22-47 cm³.m⁻³), sem corrosão aparente no sistema, provando ser viável na geração de eletricidade. A avaliação econômica por meio de *Payback* descontado, mostrou que o investimento é viável, pagando-se em pouco mais de 8 meses. A energia gerada foi totalmente exportada para a rede, sendo utilizada em escolas e unidades públicas, gerando uma economia média mensal após o oitavo mês de operação de R\$ 54.400,00 para o município.

PALAVRAS-CHAVE: resíduo sólido urbano; biomassa; bionergia; gerador elétrico; emissões, eficiência energética.

SOUZA, Abel Alves de Souza.
State University of Western Paraná, June - 2019.
Case study of distributed generation with biogás in the municipal Cascavel.
Reinaldo Aparecido Bariccatti.

ABSTRACT

Given the need for socioeconomic development of the world economy, it is necessary to adopt sustainable practices, mitigating possible environmental impacts caused by waste, valuing the latter economically. Thus, the objective of this study was to evaluate the energy potential of an electricity generating unit connected to the grid, which uses landfill biogas as fuel. The study was carried out at the landfill in the city of Cascavel, Paraná, with a population of around 300,000 inhabitants, which produces around 280 tons of solid urban waste daily. To this end, equipment was used to measure fuel consumption, the power generated and the emission of pollutants by the exhaust gases. Mathematical equations made it possible to obtain the conversion efficiency of the generator set and also the analysis of economic viability. Based on the verification of the quality of the biogas in natura, a proportion of methane (CH₄) and consequently its lower calorific value (PCI) of the biogas used in the test was obtained, with an average value of 6.15 kWh.m⁻³ for the group generator 1 and 6.17 kWh.m⁻³ for generator group 2, with respective efficiencies of 17.95% for 70 kWh power and 19.13% for 65 kWh power, with average methane percentages of 59.8 % for generator set 1 and 60.3% for generator set 2. The biogas used had only the removal of moisture by condensation, reaching low values of H₂S (22-47 cm³.m⁻³), without apparent corrosion in the system, proving to be feasible in generating electricity. The economic evaluation through discounted Payback, showed that the investment is viable, paying in just over 8 months. The energy generated was fully exported to the grid, being used in schools and public units, generating an average monthly savings after the eighth month of operation of R\$ 54,400.00 for the municipality.

KEYWORDS: urban solid waste; biomass; bioenergy; electric generator; emissions, energy efficiency.

1. Introdução

O ser humano necessita, basicamente, de comida, água, abrigo e energia; mesmo com a evolução, as culturas se modificam, mas estes itens continuam a ser indispensáveis para a sobrevivência. Com o desenvolvimento das comunidades e a necessidade de expansão territorial dos povos, culminou em grande necessidade de energia; estando fortemente envolvida nas outras necessidades vitais, e assim, o homem desde sempre vem buscando desenvolver formas mais diversificadas de energia.

O crescimento industrial e o aumento da população mundial têm como consequência o aumento da quantidade de resíduos descartados, exigindo o tratamento desse material para a manutenção da vida com qualidade no planeta. Metade da população mundial vive em cidades, respondendo por 70-80% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) de todos os tipos, incluindo resíduos sólidos urbanos (RSU) (BARRAGÁN-ESCANDÓN et al., 2018).

Resíduos sólidos urbanos podem ser usados como matéria-prima para combustíveis, como em caldeiras, gaseificação, biodigestão anaeróbia e, assim, permitir sua utilização e conversão de energia (LEE; HAN; WANG, 2017; PANEPINTO et al., 2014; ZHENG et al., 2018). Nos países emergentes, o compromisso com o desenvolvimento sustentável torna o aterro a solução mais trivial devido ao seu custo reduzido comparado à outras formas de tratamento (AGAMUTHU, 2013).

O uso de biogás de aterro foi estudado em vários locais do mundo sendo uma maneira de mitigar o impacto ambiental causado pelo gás ao usá-lo como combustível para energia (AKUJIEZE, C. N., AND IDEHAI, 2014; ARKHAROV; SIMAKOVA; NAVASARDYAN, 2016; GEWALD et al., 2012; HE; SU; KONG, 2015; HOO; HASHIM; HO, 2018; LEME et al., 2014; SHEN et al., 2018). O biogás se mistura com o ar comprimido dentro da câmara de combustão do motor e, com isto, possui uma alta octanagem pois é um combustível para se utilizar com motores dotados de sistema de velas para centelhamento (JEONG et al., 2009).

No Brasil, Dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza – ABRELPE (2017) mostram que, no ano de 2016, foram descartados cerca de 214.405 t/dia de RSU, destes, cerca de 195.452 t.dia⁻¹ foram coletados. Da parte coletada, 17,8% foram descartados em lixões que são dispostos a céu aberto sem

qualquer tipo de cuidado e proteção. Cerca de 24,2% foram dispostos em aterros controlados, que nada mais são que um lixão coberto. Por fim, 58,4% tiveram a correta destinação, o aterro sanitário, que é uma obra de engenharia focada na preservação ambiental e no potencial de aproveitamento do resíduo como biomassa. No portal de buscas da CAPES, ao fazer buscas por estudos em aterros no Brasil, apenas 241 trabalhos foram encontrados, mostrando a necessidade em intensificar estudos sobre o tema no país.

Das tecnologias existentes de conversão de biogás em energia elétrica, o uso de geradores acoplados a motores de combustão interna são a fonte mais recorrente no Brasil, devido a seu baixo custo de implantação e facilidade em obter mão de obra e reparos. Nesta mesma linha, os aterros sanitários têm potencial para implantação de moto geradores, entretanto, carecem de estudos nos quais novas tecnologias possam ser comparadas e verificar a eficiência do processo.

Objetivo geral: estudar a geração de energia elétrica a partir de grupo geradores movidos a combustão interna, utilizando como combustível o biogás captado de aterro sanitário. Avaliando o desempenho dos dois grupos geradores em escalonamento de potência, bem como suas emissões de poluentes e também a viabilidade econômica da instalação.

Objetivos específicos:

- Avaliar o consumo de biogás em diferentes níveis de carga;
- Avaliar a qualidade do biogás utilizado na geração;
- Avaliar a emissão de NO, NO_x, CO, CO₂, H₂S e temperatura dos gases de exaustão para os diferentes níveis de carga estudados;
- Calcular a eficiência energética dos grupos geradores;
- Avaliar a viabilidade econômica do investimento da mini usina de geração e captação de biogás do aterro sanitário.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Biogás de aterro sanitário

O biogás de aterro (LFG) é uma fonte de energia renovável e consiste de uma mistura de gases, sendo encontrada em diversos aterros sanitários pelo mundo afora com diferentes proporções. Tal diferença na quantidade de metano pode ser atribuída de acordo com a idade em que o resíduo foi depositado. Os aterros recentemente implantados têm biogás com maior proporção de metano, enquanto os mais velhos têm uma proporção menor (NISKANEN et al., 2013).

A qualidade do biogás do aterro depende das reações químicas e bioquímicas possibilitadas pelo meio, sendo influenciada por fatores como percentual de oxigênio, disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e taxa de decomposição do material (SCHIRMER et al., 2014). O biogás de aterro potencializa o efeito estufa, mais que o próprio dióxido de carbono (AGAMUTHU, 2013), assim, a combustão deste material tem como produto uma molécula cujo efeito estufa é minimizado.

Com a geração de energia elétrica utilizando o gás de aterro sanitário é possível diversificar a matriz energética e reduzir os impactos ambientais. Segundo Pan et al. (2018), pode-se reduzir cerca de 43,2 % o impacto ocasionado pela emissão do biogás de aterro, uma vez utilizado para a geração de energia elétrica. Além da digestão e fermentação anaeróbia, há outros meios de obtenção de energia através do RSU. O resíduo sólido urbano pode ser aproveitado para gerar energia também por processos termoquímicos (liquefação hidrotérmica, pirólise e gaseificação) (LEE; HAN; WANG, 2017).

O biogás pode cooperar para a matriz energética de um país, contribuindo para precaução da falta ou limite de energia (GUIMARÃES; GALVÃO, 2015; YANG; ZHANG; LI, 2012).

Segundo Raboni e Urbini (2014), como o biogás após filtragem tem características semelhantes ao gás natural, há possibilidade de o injetar em dutos de gás natural. Países da União Europeia estão há anos fazendo uso desta técnica, gerando tanto energia elétrica quanto utilizando como combustível em automóveis. Entre estes países, destaca-se a Alemanha que em 2011 injetou 275 milhões de m³

de biometano na rede de gás e pretende aumentar para 10 bilhões m³ de biometano até o ano de 2030.

O biogás é composto por vários gases, com seu percentual constituído principalmente por metano (CH₄) num percentual de 45% a 70% e dióxido de carbono (CO₂) entre 25% a 45% e cerca de 5% de outros gases (gás sulfídrico, monóxido de carbono, nitrogênio, oxigênio, entre outros) (GUIMARÃES; GALVÃO, 2015). Mac, Brouwer, Samuelsen (2018), dizem que o biogás de aterro possui concentração de metano variável sendo medidos percentuais de 50 % a 80%; por sua vez, State e Takzim (2019) dizem que a proporção de metano pode variar de 45 a 60%. Esta divergência em sua composição possui efeito marcante na eficiência energética, e isso se deve às condições de síntese (temperatura, oxigenação, umidade, pH, etc), bem como a composição da biomassa utilizada para o processo anaeróbico.

2.1.1. Panorama atual do lixo no Brasil

No Brasil, há um aumento na geração de RSU. Em 2017, este aumento foi de 1% em relação a 2016, sendo 78,4 milhões de toneladas de lixo geradas no país. Da quantidade produzida, foram coletados cerca de 91,2%, o restante teve destino impróprio (ABRELPE, 2017).

Segundo a ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), no ano de 2017, cerca de 42,3% do resíduo gerado no país tem disposição adequada em aterros sanitários devidamente projetados, 3.352 municípios no Brasil ainda utilizam os lixões, cerca de 40% ainda são depositados em lugares que não foram projetados para receber o material e dessa forma podem estar causando danos ao meio ambiente.

De acordo com a ABRELPE, a geração de resíduo per capita teve aumento de 0,48% em 2017, em relação a 2016, passando de 1,032 kg.hab⁻¹.dia⁻¹ para 1,035 kg.hab⁻¹.dia⁻¹ em 2017.

2.1.2. Biodegradação de RSU no aterro sanitário

A biodegradação do RSU depende das características de projeto a qual foi dimensionado o aterro e também do tipo de resíduo. Segundo Kreith e

Tchobanoglous (2002), há 5 fases da biodegradação do resíduo sólido dentro do maciço do aterro sanitário.

Fase de ajuste inicial, fase I: Quando o lixo é ensacado e colocado na lixeira, a biodegradação começa pela ação de microorganismos. Com a chegada do RSU no aterro, inicia-se a fase operacional, na qual o material é espalhado e misturado com o auxílio de máquinas. Inicialmente, o material fica descoberto e em contato com a atmosfera. O oxigênio ainda se faz presente até que se cubra o material com outras camadas de lixo ou mesmo o fechamento da célula com a cobertura superior, restringindo a entrada de oxigênio e umidade em seu interior.

Fase de transição, fase II: Depois de fechada a célula, o oxigênio começa a decair em razão do seu consumo pelas reações químicas e também por microorganismos. Assim, as bactérias aeróbicas começam a decrescer em número até a extinção do oxigênio no meio. Começa, então, o desenvolvimento de microorganismos anaeróbios. As reações químicas de conversão biológica liberam elétrons, que começam a se armazenar em nitratos e sulfatos, sendo estes reduzidos a gases como hidrogênio (H_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S).

Nesta fase há uma queda de potencial de oxido-redução, os microrganismos iniciam a conversão do material orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários. Quando formado lixiviado, este pode ter seu pH diminuído em razão de concentração elevada de CO_2 e outros ácidos dentro da camada.

Fase ácida, fase III: Esta fase possui 3 passos, que culminam em elevada produção de ácidos orgânicos e quantidades menores de hidrogênio. O primeiro passo é a transformação enzimática (hidrólise) de compostos como lipídios, polímeros orgânicos e proteínas, que possuem massa molecular mais elevada em compostos menos complexos e assim facilitando seu uso como energia e carbono celular por microorganismos.

Os compostos resultantes do passo anterior, agora são utilizados pelas bactérias e tem como produto compostos intermediários de baixo peso molecular, sendo ácido acético (CH_3COOH) e quantidades menores de ácidos fulvicos e outros ácidos orgânicos mais complexos. A acidificação é devido a liberação de amônia, hidrogênio e ácidos graxos voláteis (pode chegar a ser 95% do carbono orgânico total); com este processo, o meio se acidifica, chegando a um pH em aproximadamente 5.

O dióxido de carbono é o principal gás gerado durante esta fase e os microrganismos envolvidos nesta conversão, descritos como não metanogênicos (bactérias anaeróbias estritas e facultativas). A demanda bioquímica (DBO) e química de oxigênio (DQO) e a condutividade do chorume aumentam significativamente durante esta fase devido à dissolução de ácidos orgânicos no chorume e, devido ao baixo pH, constituintes inorgânicos como os metais pesados.

Fase metanogênica, fase IV: para Schirmer et al. (2014), nesta fase acontece a fermentação produzindo metano. A predominância é de microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em CH_4 e CO_2 . A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente. O pH do chorume, nesta fase, tende a ser mais básico, na faixa de 6,8 a 8,0; o lixiviado também tende a ficar com sua condutividade reduzida. Como nesta fase o pH fica mais alto, diminui a quantidade de materiais inorgânicos solubilizados.

Fase de maturação, fase V: Segundo Regatieri (2009), esta fase ocorre após grande quantidade do material orgânico ter sido biodegradado e convertido em CH_4 e CO_2 durante a fase metanogênica. Como a umidade continua a migrar pela massa do lixo, porções de material biodegradável ainda não convertidos acabam reagindo. A taxa de geração diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta. Dependendo das medidas no fechamento do aterro, pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio podem ser encontradas no gás do aterro.

Na figura 1, temos o resumo das fases com suas respectivas composições de gás.

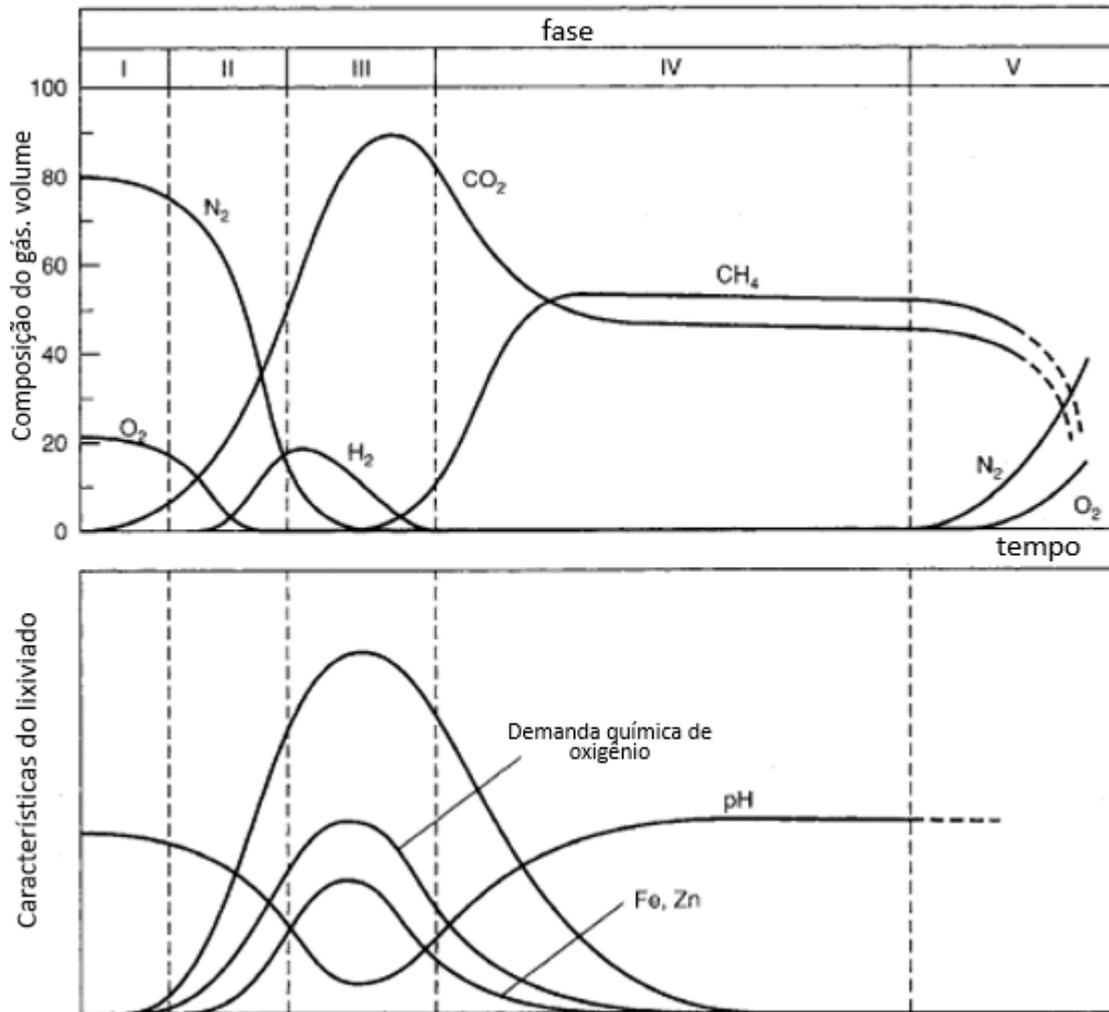


FIGURA 1. Características de biodegradação do material dentro do aterro sanitário por fases.
 Fonte: adaptado de Kreith e Tchobanoglous (2002)

A duração de cada fase depende de características físicas e qualitativas do aterro sanitário. Se o material depositado estiver muito compactado e a percolação da água for afetada, gerando no material um meio que não é o propício para o desempenho da fase, pode acontecer retardamento ou mesmo prolongamento. Logo, a produção do gás variará segundo as características ótimas de bioconversão.

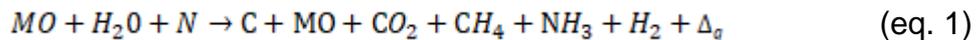
Segundo Ensinas (2003), a produção de metano necessita de um ambiente favorável para que as reações químicas aconteçam. O pH ótimo para a produção do metano situa-se entre 7 e 7,2, mesmo que com o início do processo apresentem pH ácido, ao decorrer seu valor aproxima-se da neutralidade, mais especificamente após a fase metanogênica. A temperatura do aterro, para que aconteça a biodigestão anaeróbica, deve ficar entre 29 e 38 °C para bactérias mesofílicas e de 49 a 70 °C para as termofílicas; abaixo de 10 °C há uma queda brusca na taxa de

geração do gás metano.

A composição gravimétrica do lixo influencia diretamente na quantidade de metano produzida pelo aterro, pois, quanto maior a taxa de material biodegradável, maior será a taxa de geração de gases. A umidade é também muito importante para o equilíbrio das reações, sendo que a umidade de 60 a 90% pode aumentar a geração de biogás. A construção do aterro com baixa permeabilidade para controle da formação do chorume mantém a umidade baixa, o que prejudica a formação do biogás.

2.1.3. Conversão do RSU em biogás

A transformação anaeróbia geral da fração orgânica do resíduo presente no aterro sanitário podem ser descritas por equações químicas, desde que em condições de umidade ideais para a formação do biogás, como segue.



Em que

MO: matéria orgânica; N: Nitrogênio; H₂O: água; C: Carbono; CO₂: dióxido de Carbono; CH₄: metano; NH₃: Amônia; H₂: Hidrogênio; Δ_q : calor.

Segundo Kreith e Tchobanoglous (2002), aterros sanitários que tem dificuldade de percolação de umidade, podem acabar por ficar em condição “mumificada”, ou seja, sem que reações de biodegradação aconteçam. Assim, procedimentos operacionais do aterro sanitário, como compactação do maciço, permeabilidade à umidade, bem como características hidrológicas da região, influenciam na quantidade de gás gerada no decorrer do tempo.

2.1.4. Células de depósito de RSU

O projeto de um aterro sanitário deve compor critérios como escavação e preparo do solo com impermeabilização da célula com membrana protetora, adensamento das camadas de resíduo, cobertura com terra e plantio de vegetação adequada na superfície, drenagem de líquidos e gases. Tudo pensado para que não

haja prejuízos ao meio ambiente, como a contaminação de lençóis freáticos e cursos de rios, mal cheiro e atração de animais para alimentação, proteção da atmosfera em razão dos gases produzidos, os quais podem agredir a camada de ozônio. Deste modo, estudos vem sendo conduzidos com a finalidade de estudar técnicas de deposição (JOSEPH; KUNTIKANA; SINGH, 2019; SÁNCHEZ et al., 2019; YONG, 2019). Existem variações de solo que possibilitam maior ou menor risco ao meio ambiente, tanto de infiltração quanto de escape do gás para a atmosfera. Em estudo realizado na Malásia (YONG, 2019) utilizando dois solos tropicais diferentes, percebeu-se que a condutividade hidráulica tende a diminuir quando é depositado resíduo. Os autores atribuem esta característica à deposição de materiais finos que preenchem as lacunas presentes no solo compactado e assim restringindo a percolação de água no solo.

Para comportar melhor o montante de lixo, é realizada a abertura de trincheira com auxílio de engenharia. O projeto deve prever a retirada de chorume para o tratamento, geralmente em lagoas estabilizadoras. O lixo é, então, compactado com auxílio de máquinas, buscando concentrar maior densidade do material, tanto para maximizar a vida útil do sistema, quanto melhorar características físicas do talude.

Geomembranas trazem segurança para o solo. Isto porque elas agem como um selante na base da célula, assegurando que a drenagem de chorume seguirá o curso previsto em projeto e não irá percolar pelo solo (MIRHAJI et al., 2019). Obviamente que exige cuidados com o trabalho, embora a membrana seja bem resistente, pois, caso o operador de máquina não trabalhe, com cautela pode ocasionar danos e colocar a proteção em risco.

2.1.5. Coleta e gestão de resíduos

O lixo pode ter valor agregado, como é o caso de alguns materiais orgânicos que, segundo Pagliaccia et al. (2019), podem ser aproveitados em biodigestores para geração de energia ou mesmo serem depositados no aterro sanitário e lá ter essa geração. Segundo Lou e Nair (2009), é possível fazer um pré-tratamento no lixo antes de este ser depositado no aterro, a compostagem favorece a maximização de volume do aterro sanitário, porém, ela acaba por diminuir a produção de biogás, isto em razão de uma parte do material orgânico ser consumida no processo.

Para os materiais reciclados é de extrema importância que estes sejam encaminhados a programas de reutilização, pois estes não possuem potencial para geração de biogás e, conseqüentemente, acabam ocupando volume no montante, aumentando o custo do aterro por ocupar maior área (ANDRADE, 2017). No Brasil, a lei 12.305 de 2010 trata sobre resíduos sólidos urbanos, a qual é discriminado RSU de atividades domésticas e de algumas atividades comerciais.

Segundo Junior, Ferreira e Siqueira (2017), locais devidamente projetados para cumprir requisitos mínimos de lei para receberem lixo e este ser depositado e ser tratado são conhecidos como aterro sanitário. Por outro lado, temos depósitos que recebem o lixo, porém não há nenhum tipo de tratamento sanitário para que o meio ambiente seja poupado, são conhecidos, segundo Cavallet e Neto (2013), como lixões. Ambientes que recebem o lixo, mas apenas o cobrem sem ter um tratamento para evitar que o chorume e o mau cheiro do material se propague recebem o nome de aterro controlado.

2.2. Agentes Poluidores do Biogás

2.2.1. Sulfeto de hidrogênio (H₂S) no biogás

O H₂S presente no biogás é um elemento que é gerado através da degradação anaeróbica de compostos que contenham enxofre (S), sendo mais expressivo nas proteínas; porções de elementos aniônicos podem ser reduzidos a H₂S, como o SO₂ que pode ser uma matéria prima inserida no material (RASI; LÄNTELÄ; RINTALA, 2011). Segundo Zhang et al. (2013), a formação de H₂S e outros compostos de enxofre se dá através da oxidação incompleta do material. Embora tenha no biogás de aterro, sua concentração é baixa, sendo sua proporção considerada por Nock et al. (2014) como praticamente insignificante.

O elemento quando inserido em motores pode oxidar os metais e conseqüentemente danificar o motor e outras partes do sistema. A ocorrência do fenômeno está diretamente ligada a formação de SO₂, quando H₂S submetido a temperaturas altas, tal gás resultante culmina em ácidos que são altamente prejudiciais para o sistema (PRAKASH et al., 2016).

O H₂S pode ser inibido quando o biogás é gerado em biodigestores, sendo possível através da utilização de quantidade controlada de O₂ sendo injetada,

porém, a reação é dependente da temperatura, pois pode acontecer de o oxigênio se interligar com o H₂S e formar SO₂, sendo necessário a inserção de um catalisador para este processo (PALMA; BARBA, 2014).

A remoção de H₂S por adsorventes têm se mostrado eficiente. Trabalhos como o de Pipatmanomai et al. (2009) mostraram que colunas adsorventes de carvão ativado, impregnados com solução de lodo de Potássio (KI) diluída a 2% demonstram 100% de eficiência na filtragem. Para atender a demanda de 1,2 m³.h⁻¹, utilizaram 2 colunas operando intercaladamente a cada 5 horas, para reverter o processo de saturação os autores utilizaram a inserção de ar forçada.

Ryckenbosch, Drouillon e Vervaeren (2011) apresentam em seu trabalho de pesquisa que a adição de cloreto de ferro no tanque do biodigestor possibilita a remoção do H₂S durante a produção de biogás. Após a produção do biogás é possível a utilização de pellets de óxido de ferro, juntamente com a solubilidade em elemento líquido para a retirada do H₂S do biogás.

2.2.2. Dióxido de carbono (CO₂) no biogás

O CO₂ tem sua origem no biogás devido às reações do material orgânico em decomposição, perdendo seu percentual apenas para o metano, com proporções encontradas entre 35 a 50 % (ARKHAROV; SIMAKOVA; NAVASARDYAN, 2016; HOO; HASHIM; HO, 2018; JEON; LEE, 2015).

O CO₂, além de diminuir o poder calorífico do biogás, ainda atrapalha na queima em motores. A temperatura interna da câmara no momento da combustão do combustível tem uma redução de cerca de 21% quando o biogás tem quantidades elevadas de CO₂, quando comparado com apenas Metano (JUNG; PARK, 2017).

2.2.3. Demais traços poluidores do biogás

Embora Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) sejam encontrados com percentagens menores que 1% no biogás, estes são fortes poluentes atmosféricos. Pode-se encontrar compostos orgânicos como hidrocarbonetos saturados e insaturados, ácidos álcoois orgânicos, cadeias de hidrocarbonetos aromáticos, compostos halogenados e compostos de enxofre, como siloxanas e mercaptanos

(MORENO et al., 2014).

Siloxanos são prejudiciais por ocasionar encrustações em mecanismos mecânicos como motores de combustão interna ou microturbinas, sendo importante a sua remoção do gás para evitar danos aos sistemas. Segundo Feilberg et al. (2010) no biogás também podem ser encontrados Mercaptanas, que são extremamente prejudiciais à saúde, ocasionando graves lesões, sendo complexa sua percepção pois praticamente não tem cheiro.

2.2.4. Índice de Wobbe

A mistura de gases, em especial o biometano que é inserido na rede de gás natural, é de grande interesse de quem fornece e quem adquire o gás. Para conhecer a qualidade do gás, utiliza-se o índice de Wobbe. Tal índice tem como objetivo analisar a semelhança entre gases para que estes possam ser misturados.

Para a definição do índice de Wobbe W como o quociente entre o poder calorífico superior e a raiz quadrada da densidade relativa, leva-se em consideração que sejam obtidos em mesma condição de pressão e temperatura (GRABSKI, 2015). A equação 2 possibilita calcular o índice.

$$W = PCS/\sqrt{d} \quad (\text{eq. 2})$$

Em que:

W : índice de Wobbe ($J.Nm^{-3}$); PCS : poder calorífico superior do gás ($J.Nm^{-3}$);
 d : densidade relativa do gás.

A Agência Nacional de Petróleo – ANP, em seu decreto 685 de 26 de setembro de 2017, informa que, para a consideração de biometano, o gás deve ter o índice de Wobbe entre 40.500 e 45.000 para a região Norte, e entre 46.500 e 53.500 para as demais regiões. A diferença é devido ao fato de que na região norte não se é utilizado o gás para transporte, tendo finalidades que exijam menor pureza.

2.2.5. Geração Distribuída de energia

Quando comparada com a geração centralizada, vários são os benefícios da geração descentralizada de energia elétrica. Quando utilizada em forma de

cogeração, torna o sistema mais eficiente, além da possibilidade de o produtor utilizar este calor que seria dissipado em algum processo, e assim economizar energia que pegaria da rede. Há ainda um melhor proveito da energia gerada, pois linhas muito distantes fazem com que haja perda de carga. Outro importante ponto é a utilização de energias renováveis como matéria prima para produção de energia elétrica e assim minimização de impactos ambientais (MANFREN; CAPUTO; COSTA, 2011).

O mesmo trabalho aponta ainda que a energia de forma descentralizada é uma alternativa a compor a matriz energética segundo as condições regionais. Além disso, a diminuição de área e conseqüentemente economia de terras produtivas, tendo em vista que a geração descentralizada possibilita a diminuição de empresas de energia, e até mesmo de barragens no caso de aproveitamento de energia potencial da água.

Quando forma-se consumidores que também são geradores de energia, aumenta-se conseqüentemente a quantidade de produção de equipamentos geradores de energia; caso esta produção não siga técnicas sustentáveis, pode acontecer de gerar poluição; além do mais, é importante que o país tenha políticas que subsidiem tais produtores (KOPANOS; GEORGIADIS; PISTIKOPOULOS, 2013).

2.2.6. Mecanismos de conversão energética do biogás

2.2.6.1. Turbinas e microturbinas

A tecnologia de microturbinas veio para agregar mais uma possibilidade de geração ao produtor rural e também às unidades geradoras presentes em aterros sanitários e biodigestores em geral. Segundo (HIRANO; SILVA, 2018), as microturbinas possuem baixo peso e dimensões pequenas, sendo facilmente incorporadas a ambientes; o equipamento possui flexibilização da vazão de abastecimento de combustível, possibilitando sua utilização até mesmo com baixas vazões de gás. Segundo o mesmo estudo, uma característica interessante das microturbinas é a sua utilização do biogás in natura, sem qualquer tipo de filtragem, isto em razão do melhoramento de materiais, simplificando o sistema.

Sistemas de microturbinas podem ser utilizados em cogeração, aproveitando melhor a energia que seria dissipada em forma de calor. Esta prática possibilita que

seja mitigado impactos ambientais (KOPANOS; GEORGIADIS; PISTIKOPOULOS, 2013). Quando utilizadas de modo independente, Microturbinas chegam a uma eficiência de até 45%, se utilizadas em cogeração podem chegar a 80-90% de eficiência (NELSON et al., 2018).

As microturbinas a gás tem o ar de entrada aspirado e forçado para seu interior à alta velocidade e pressão, na câmara de combustão é misturado com o biogás e então queimado; resultando em gases de exaustão com alta temperatura, sua expansão faz com que as aletas de saída do gás tenham força e possam dar continuidade ao ciclo (MELO, 2015). A figura 2 mostra um modelo de microturbina.



FIGURA 2. Microturbina modelo CR30 do fabricante Capstone
Fonte: Capstone (2014)

Mesmo com baixo poder calorífico, combustíveis renováveis como syngás, biogás, dentre outros, podem ser aproveitados em sistemas de microturbinas a gás (PANTALEO; CAMPOREALE; SHAH, 2013; SÉRGIO et al., 2018). Contudo, cada tipo de material pode transmitir uma característica de operação ao sistema, podendo variar sua temperatura do combustor e emissor, além de modificar ruído. Uma microturbina com potência de 250 kW, pode chegar a uma temperatura máxima de trabalho da ordem de 1200 °C (SÉRGIO et al., 2018).

2.2.6.2. Biogás em motores de combustão interna

Motores de combustão interna são amplamente utilizados para transformar a energia presente em combustíveis por meio de combustão interna em energia mecânica. Assim, quando acoplados em geradores, possibilitam a geração de energia elétrica. Muitos estudos são conduzidos com o objetivo de compreender o desempenho de combustíveis renováveis como uma alternativa aos combustíveis fósseis, bem como o estudo sobre motores convertidos para usar esses

combustíveis renováveis (ALAGUMALAI; SADEGHINEZHAD et al., 2014; SWAIN; SHRESTHA, 2014). No Brasil, o uso de motores de combustão interna é comum para a geração de eletricidade, e eles são facilmente adaptados para usar o biogás como combustível. Além disso, é a tecnologia mais acessível e por já estar consagrada no Mercado, sua manutenção torna-se menos onerosa.

Pode-se utilizar inclusive combustíveis de baixo poder calorífico como Syngás que contém de 4 a 6,7 MJ.m⁻³, mas que possibilita operação de forma aceitável ao sistema, isto em razão da tolerância em relação a qualidade do combustível (MARCULESCU; CENUȘĂ; ALEXE, 2016).

Utilizado para minimizar efeitos de atrito, o óleo lubrificante pode ter efeitos ocasionados pelo biogás in natura, aumentando a quantidade de H₂S e podendo vir a gerar desgastes no motor, sendo importante observar constantemente a qualidade do lubrificante (BERTINATTO et al., 2017).

2.2.6.3. Biogás em motores ciclo Otto

No Brasil, os motores ciclo Otto talvez seja o mecanismo mais simples de conversão de energia presente no biogás para a geração de energia elétrica, isto em razão de seu baixo custo inicial e também pelo baixo valor de manutenção quando comparado a outros equipamentos.

No país é comum que pequenos agricultores utilizem o biogás para geração de energia neste tipo de motores. Segundo Hotta, Sahoo e Mohanty (2019), motores ciclo Otto podem ser utilizados para conversão do biogás em energia elétrica com baixos níveis de emissões de poluentes. O mesmo trabalho descreve, ainda, que para a injeção de biogás como combustível são necessárias poucas modificações, que são basicamente relacionadas à alimentação. É possível alterar as características mecânicas no motor e obter até mesmo um incremento na eficiência, o qual, modificando a compressão do motor, aumentando-a, pode-se diminuir o consumo de combustível (GUPTA; MITTAL, 2019).

Em trabalho de pesquisa realizado com motor ciclo Otto de 1 cilindro, operando com biogás da suinocultura in natura, houve diminuição na emissão de NO_x e CO, em 40% e 81,5% respectivamente, contudo, houve aumento na emissão de hidrocarbonetos não queimados e também CO₂, em 6,8% e 40% respectivamente (HOTTA; SAHOO; MOHANTY, 2019). Utilizando-se a recirculação de gases,

conhecido como *Exhaust Gas Recirculation* (EGR), é possível recircular uma parte dos gases e obter diminuição das emissões de NO_x (CHAUDHARI et al., 2019).

A inserção do biogás como combustível no motor, é realizado através da entrada de ar. O mecanismo dosador de combustível e ar que pode ser um Ventury, são instalados e assim facilmente se pode gerar energia com o biogás. Há pesquisas que apontam que a utilização de biogás como único combustível em motor ciclo Otto acarreta em menor potência e menor torque quando comparado ao mesmo motor utilizando gasolina (ARKHAROV; SIMAKOVA; NAVASARDYAN, 2016; HOTTA; SAHOO; MOHANTY, 2019). A explicação para diminuição da eficiência do motor com biogás em relação à gasolina ocorre por conta de que o gás possui sua energia menos concentrada em volume, quando comparada com a gasolina (MIHIC, 2004).

2.2.6.4. Emissão de poluentes na geração de energia com biogás

O desenvolvimento de novos combustíveis necessita de tecnologias para mitigar impactos ambientais com emissões ocasionadas por sistemas de conversão, como é o caso de geradores que utilizam motores de combustão interna. Poluentes trazem consequências ambientais que atingem diretamente o ser humano, como é o caso da chuva ácida, ocasionada através da reação de água com poluentes. Contribuem para o fenômeno: CO, CO₂, NO_x e SO₂. Tais elementos químicos são produzidos na queima em motores de combustão interna (SILVA, 2016).

Para Teixeira e Cristiano (2005), as emissões de poluentes por motores de combustão interna operando com biogás, está relacionada com a carga a ser requerida. A eficiência de queima do combustível também é determinante, e deve estar regulado a uma proporção ótima com gás atmosférico para melhorar a mistura de combustível. Segundo Coelho (2015), embora o uso de motores de combustão interna sejam a alternativa menos onerosa, quando comparado com turbinas a gás acaba por emitir maior quantidade de poluentes, o NO_x que é emitido chega a ser 315 vezes mais prejudicial que o CO₂.

3. Material e Métodos

O estudo foi realizado no aterro de resíduos sólidos do município de Cascavel-PR, localizado em área rural, nas coordenadas geográficas 24°51'13.8 "S e 53°29'34.9" W, constituído por uma área de 25 hectares, 16 dos quais destinados às células de depósito de resíduos sólidos urbanos (RSU). A região possui clima subtropical, com estações quentes e temperadas, temperatura média de 22°C e chuvas regulares e significativas em todas as estações do ano.

A topografia da área onde o aterro está localizado é desigual, com uma inclinação máxima de 15 graus. A propriedade do aterro é separada da vizinhança por um cinturão verde que consiste em eucaliptos com uma altura superior a 10 metros. As áreas vizinhas são compostas por agricultores, que mantêm suas atividades normalmente. A figura 3 mostra a área do aterro sanitário.



FIGURA 3. Aterro sanitário do Município de Cascavel - PR

O município de Cascavel tem uma estimativa de 320.000 habitantes em 2018, com uma renda mensal média de US\$ 680,00 (BRAZIL, 2010). O município é caracterizado por estar em uma faixa de grande produção agrícola, com predominância de culturas de soja e milho, com pecuária composta por porcos, leite e gado de corte, e aves para produção de carne e ovos, com agro-negócios bem desenvolvidos e comércios de vários ramos econômicos.

3.1. Tratamento do resíduo sólido urbano

A coleta de lixo é realizada diariamente no município, atualmente sendo realizada por 12 caminhões que circulam pelo município, incluindo a área rural e industrial. Os veículos apresentam um balde equipado com um sistema interno de compactação para armazenamento temporário do material. Os caminhões coletores passam por cada residência a cada 3 dias, conforme programação, exceto nos casos em que a carga diária é maior, fazendo com que sua programação se tenha com maior frequência de passagem, como é o caso de residenciais e hospitais.

No aterro municipal, 280 toneladas métricas de lixo urbano sólido chegam diariamente, sendo despejadas pelos caminhões da região, onde são depositadas e posteriormente compactadas por tratores esteira e preparadas no aterro do aterro, podendo atingir mais de 20 metros de profundidade. Assim, o material está em um ambiente anaeróbico, propício para a formação de biogás. Antes de depositar os resíduos, a área foi primeiramente impermeabilizada para conter o lixiviado que deixa o material depositado, seguido pela escavação da célula e pela compactação do solo, que é então coberto com uma membrana de polietileno de alta densidade.

O lixo é compactado com uma máquina de esteira, deixando os resíduos em uniformidade sólida, até o seu limite de cerca de 13 metros de altura. É então coberto por uma camada de solo compactada com cerca de 1m de espessura, seguida de plantação de grama na superfície. Cada célula leva um período de 12 a 15 meses para ser preenchida com resíduos. O lixiviado que flui do aterro é transportado por condutas para as lagoas de tratamento. O esquema de tratamento de resíduo sólido é apresentado na figura 3.

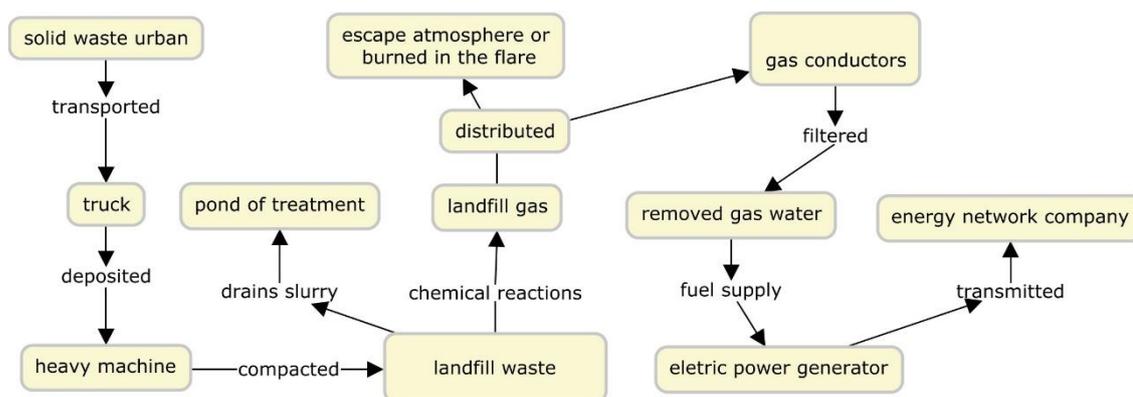


FIGURA 4. Esquema de tratamento do aterro sanitário

3.2. Coleta do biogás

O biogás produzido pela massa de resíduos presente no aterro é drenado horizontalmente por trilhas feitas com fragmentos de rochas de cerca de 0,2 metros de diâmetro, interligados a drenos verticais com altura de 12 metros, constituídos de tubos de concreto munidos com furos laterais para que o biogás consiga drenar para o seu interior. Ao entorno do dreno vertical, são inseridos fragmentos rochosos com uma camada de cerca de 0,5 metros, o que facilita a fuga do biogás do aterro e também serve para drenar o lixiviado. A Figura 4 mostra o duto vertical, este está fora da camada de resíduo aguardando para ser ligado à linha de gasoduto.



FIGURA 5. Duto vertical para escoamento do biogás.
Fonte: O autor.

Na extremidade superior dos drenos de fluxo de biogás, o vazamento de gás é restrito usando uma válvula, a fim de limitar sua fuga para a atmosfera. A restrição é feita usando membrana de plástico e concreto, um tubo com bitola de 0,05 metros e uma válvula acoplada ao gasoduto que transportará o gás para uso como combustível no motor do gerador.

A tubulação é feita de tubos de PVC soldados, que é um material mais comum e menos caro no Brasil. A tubulação que alimenta o grupo gerador 1 tem

uma extensão de 340 metros de contagem, incluindo a captura de 12 drenos de biogás que fluem através da massa sólida de lixo compactado. Destes drenos, 8 são coletados em celas com resíduos enterrados há 5 anos, e 4 drenos são coletados de resíduos enterrados há 6 anos.

O grupo gerador 2 utiliza uma coleção de recursos de dutos de 260 metros, em 7 drenos de biogás, dos resíduos enterrados há 4 anos, bem como 2 drenos para os resíduos enterrados há 5 anos, totalizando 9 drenos de biogás neste duto.

Cada gasoduto tem, a cada 6 metros, um suporte alocado na parte superior do aterro, uma haste metálica ou de madeira que suporte suspenso o duto. Esse aterro é modificável e está em depressão, com locais mais baixos, fazendo com que o gasoduto acumule água a partir da umidade do biogás. Para retirá-lo da tubulação, uma válvula é instalada nos pontos mais baixos. Como a inclinação do aterro é maior em cerca de 15 metros de altura em relação à sala de máquinas, onde os grupos geradores estão alojados, a tubulação deve seguir a inclinação do aterro, que é de cerca de 75 graus em relação à topografia plana do aterro.

O fluxo de biogás passa por este declive, fazendo com que a umidade que flui através das paredes do duto seja retida na base do declive em um recipiente com uma válvula, operada diariamente para remover a água. A figura 5 mostra os dutos e suas características. Para garantir que toda a umidade seja removida do duto, há também uma câmara de resfriamento que condensa a água no interior, deixando o gás sem água para injeção no motor do gerador.

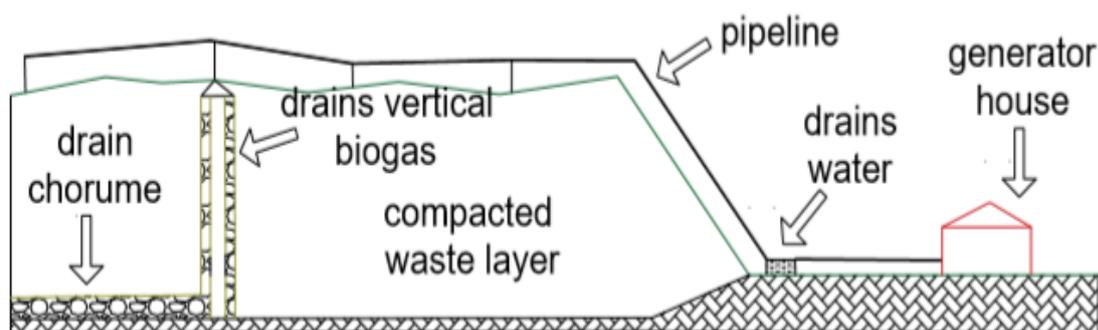


FIGURA 6. Captura do biogás e chorume gerados no montante do aterro

3.3. Mini geração de energia elétrica

Os conjuntos de geradores requerem manutenção preventiva ou corretiva. Para tanto, necessitam parar para que o trabalho seja executado. Portanto, a equipe

técnica do aterro optou por colocar dois grupos de geradores para que não corra o risco de ficar sem energia. Os grupos geradores instalados possuíam a mesma especificação e tempo de uso durante os testes de 1.600 horas, cada um com capacidade máxima de geração de 77 kW, consistindo de um modelo GMWM-120, fabricado pela empresa ER-BR. O modelo do motor é um motor diesel ottolizado, marca MWM, modelo 6.12T6C, com sistema de injeção eletrônica programável. A figura 6 mostra o grupo de geradores em trabalho.



FIGURA 7. Grupo geradores em estudo.

Fonte: o autor

O gerador é um alternador síncrono, marca WEG, modelo GTA202A, que, de acordo com o fabricante, possui uma eficiência de (η) para $\cos \varphi = 0,8$: 91,10%. A eletricidade produzida pelo grupo gerador é exportada para a rede. A energia é medida em kW pelo medidor fornecido pela empresa que administra a rede elétrica, sendo então exportada com segurança para a rede, que está em vigor no Brasil na forma de créditos de 5 anos (ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015). Neste caso, a eletricidade é convertida em créditos para uso em prédios públicos, para atender a população local.

A implementação de projetos de geração distribuída no Brasil exige a emissão de uma licença pela empresa local de distribuição de energia. O projeto em estudo foi aprovado e licenciado para distribuição na rede de até 135 kW. Se este limite for excedido, o sistema é programado para interromper a injeção de energia na rede.

Os grupos geradores instalados também possuem um sistema de monitoramento e controle remoto, que é conectado à internet e inclui um website, para que o gerente do sistema possa ter informações em tempo real sobre a produção de energia por cada conjunto de equipamentos, o status de cada sistema, e avisos de manutenção, como troca de óleo ou revisão preventiva.

Além de passar informações pela rede através da Internet, o sistema de controle eletrônico de cada grupo gerador tem a possibilidade de configurar automaticamente, de acordo com as configurações do usuário, a potência a ser gerada através de reguladores, realizando um gerenciamento automatizado do equipamento e regulando sua frequência (60 Hz), bem como realizar manobras de proteção e injeção para a energia gerada na rede de distribuição.

3.4. Parâmetros monitorados

Para o desenvolvimento deste estudo, vários parâmetros ambientais, mecânicos e elétricos foram monitorados, conforme apresentado na Tabela 1. Os instrumentos utilizados para a medição estão descritos na Tabela 2.

Tabela 1. Monitoramento do biogás, energia elétrica e meio ambiente

Parâmetro	Variável
Biogás	Concentração de metano, consumo do grupo gerador, temperatura
Energia elétrica	Energia elétrica e consumo, operação do motor
Meio ambiente	temperatura ambiente

Tabela 2. Especificação técnica da instrumentação utilizada para verificação da eficiência energética e qualidade do biogás.

Instrumento	Marca	Modelo	Tipo	Unidade de medida	Precisão	Faixa operação
Medidor vazão	Magnetrol	TA2	Termico Dispersion transmitter	Nm ³ h ⁻¹	± 1% R. + 0,5% F.S.	120 Nm ³ /h
Temperatura	Instruterm	TAFR-180	hot wire	°C	± 0,8% F.S.	0-50 °C
Concentração Metano	Landtec	GEM5000	Infravermelho (NDIR)	%	± 0,5 % F.S.	100%

CO ₂ (%)	Landtec	GEM5000	Infravermelho (NDIR)	%	± 0,5% (vol)	100
O ₂ (%)	Landtec	GEM5000	Célula eletroquímica	%	± 1% (vol)	25
CO (%)	Landtec	GEM5000	Célula eletroquímica	Ppm	± 1% F.S.	2000
H ₂ S (%)	Landtec	GEM5000	Célula eletroquímica	Ppm	± 2 % F.S.	500
analisador energia	ER-BR	ER-BR	eletrônico	kW	± 0,5% R + 2 dígitos	200 kW

Os dados de biogás, ambiente e eletricidade foram coletados no momento de cada teste com 12 repetições, e cada medição foi realizada com uma frequência de 1 minuto.

Os equipamentos de verificação da qualidade do biogás, vazão e temperatura, foram instalados na rede com dutos de PVC de 50mm que alimentam o motor do gerador com o biogás proveniente das células residuais do aterro sanitário. Para a instalação do medidor de vazão, foi necessário garantir que haja fluxo laminar dentro da tubulação que segura o sensor. Assim, 1m atrás do medidor e 0,3m na frente do sensor, um tubo com 60mm foi adaptado para o acoplamento com a rosca do equipamento de medição, que relata a direção correta do fluxo de gás. A fim de coletar dados sobre a temperatura e a qualidade do biogás usado no teste, uma conexão tipo T foi instalada no duto ao lado do motor do gerador, com uma válvula que permitia a inserção de sensores de temperatura e coleta de biogás pelo analisador. A Figura 7 mostra cada unidade de equipamento instalada na fonte de alimentação do grupo gerador.

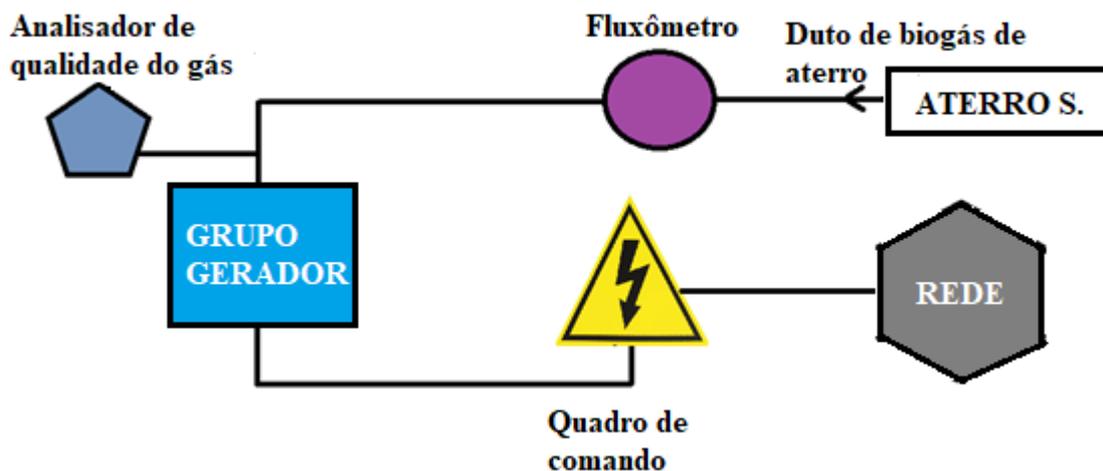


FIGURA 8. Fluxograma da energia gerada e exportada para a rede.

3.5. Teste na escala de potência

O sistema de controle de cada gerador também possibilita realizar a operação manualmente. Assim, permite que a energia a ser injetada na rede seja configurada no painel de controle. Este parâmetro é importante tanto para maior controle de geração quanto para proteção de circuitos, já que permite 0-77kW de potência para cada gerador. A configuração do teste manual foi então realizada para cada gerador, com escalonamento em faixas de potência pré-estabelecidas, começando em 10kW e com acréscimos de 10kW à potência de 70kW.

O processo realizado em cada uma das 7 potências consistiu em aguardar 10 minutos após configurar manualmente a potência necessária para que o grupo gerador tenha estabilizado seus parâmetros de consumo, frequência e potência. Seguir a coleta de dados do teste de geração de energia, fluxo de biogás e sua concentração de CH₄, CO, O₂, H₂S, além da temperatura de admissão do biogás pelo motor do grupo gerador. A frequência de coleta de dados inicia-se após a estabilização dos parâmetros do sistema, sendo coletada a cada 30 segundos, por 8 minutos, totalizando 12 repetições.

3.6. Equações utilizadas para cálculos de performance dos grupo geradores

Com a aquisição dos dados, é necessário tratá-la e, para isso, são utilizadas equações matemáticas para chegar à quantificação do consumo e eficiência do

grupo gerador. Ao calcular o poder calorífico inferior (LHV) do biogás do aterro, a densidade do metano obtida pela temperatura de uso do gás com os valores padrão deve ser considerada como fornecida, na Equação 3 (VON, 1988).

$$\rho_{\text{metano}} = \rho_{\text{met}} \cdot \frac{T_{\text{med}}}{T_{\text{std}}} \quad (\text{eq. 3})$$

Na qual ρ_{metano} = densidade do metano compensado ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); T_{std} = temperatura do metano em condições padrão (273 K); T_{med} = temperatura do metano nas condições medidas (K); ρ_{met} = densidade do metano nas condições padrões ($0,71746 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) (SILVA, 2015).

Na densidade calculada para a temperatura desejada, o valor calorífico do biogás com a concentração de metano e o LHV padrão para o gás metano é obtido, como visto na Equação 4.

$$LHV_{\text{biogas}} = \%_{\text{metano}} \cdot \rho_{\text{metano}} \cdot LHV_{\text{std}} \quad (\text{eq. 4})$$

Em que $\%_{\text{metano}}$ = concentração de metano no biogás (%); ρ_{metano} = densidade compensada de metano ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); LHV_{std} = poder calorífico inferior do metano ($11,1 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$).

No entanto, os dados de fluxo coletados são apresentados em $\text{Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (metros cúbicos CNTP) de biogás e devem ser corrigidos para a temperatura de trabalho medida. Com base na Equação 1, que realiza a compensação da densidade, pode-se calcular a vazão corrigida de biogás, como semente na Equação 5.

$$Q_{\text{biogas,comp}} = Q_{\text{biogas,std}} \cdot \frac{T_{\text{std}}}{T_{\text{meas}}} \quad (\text{eq. 5})$$

Em que $Q_{\text{biogas,comp}}$ = vazão compensada de biogás ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$); $Q_{\text{biogas,std}}$ = vazão medida de biogás ($\text{Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$);

Através do consumo específico de gás pelo gerador, é possível calcular sua eficiência, como visto na Equação 6 (Y.A.; M.A., 2013).

$$sfc = \frac{Q}{P} \quad (\text{eq. 6})$$

Em que sfc é o consumo específico de biogás ($m^3.kWh^{-1}$); Q = consumo instantâneo de biogás pelo grupo gerador ($m^3.h^{-1}$); P = potência de energia gerada pelo sistema (kW);

A eficiência global da conversão de biogás em eletricidade é calculada conforme mostrado na Equação 7 (KORAKIANITIS; NAMASIVAYAM; CROOKES, 2011).

$$\eta = \frac{P}{Q * LHV_{biogas,comp}} \quad (eq. 7)$$

Em que η = eficiência global de energia; $LHV_{biogas,comp}$. = biogás com poder calorífico corrigido ($kWh.m^{-3}$).

A eficiência dos motores de combustão interna que permitem a conversão da energia presente no biogás em energia mecânica para girar o gerador é calculada através da eq. 8.

$$\eta_{motor} = \frac{\eta}{\eta_{gerador}} \quad (eq. 8)$$

Em que η_{motor} = eficiência energética interna do motor (%); η = eficiência energética global (%); $\eta_{gerador}$ = eficiência do grupo gerador (%).

3.7. Análise dos gases de exaustão

Os gases de exaustão foram analisados com equipamento da marca Bacharach, modelo PCA 3. Os gases mensurados foram: monóxido de carbono (CO_2), monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2), dióxido de enxofre (SO_2). O equipamento possui 4 sensores instalados interiormente, sendo necessário posicionar cada um deles para medir corretamente o seu gás analisado. O equipamento conta ainda com medição de temperatura dos gases de exaustão e também do gás atmosférico ao entorno do aparelho.

A coleta de dados consistiu em 5 repetições para cada condição avaliada. Após a configuração manual para a potência desejada, o grupo gerador necessita ficar um período de calibração para ficar em conformidade com a energia da rede, em que, após este período, se iniciava a coleta de dados. A coleta de dados dura cerca de 50 segundos para não ocasionar danos ao equipamento que, após a coleta, precisa succionar gás atmosférico para limpar a sonda. Os dados foram, então, baixados juntamente ao computador, o qual foram convertidos em planilhas

eletrônicas para então serem analisados. As especificações técnicas do equipamento encontram-se na tabela 3.

Tabela 3. Especificações técnicas do analisador de gases de exaustão

Gás	Faixa de análise	Precisão
NO	0 - 3000 ppm	±5 ppm
NO ₂	0 - 500 ppm	±5 ppm
SO ₂	0 - 5000 ppm	±10 ppm
CO (baixo)	0 - 4000 ppm	±10 ppm
CO (alto)	4001 - 20000 ppm	±10 ppm
temperatura	20 - 1200	± 20 (°C)

Fonte: Bacharack (2011)

3.8. Equações para avaliação econômica

A energia gerada no aterro sanitário do município de Cascavel é toda injetada na rede e pode ser utilizada em escolas, creches, praças públicas e outros espaços públicos, permitindo a economia de recursos para o poder público e, conseqüentemente, para os civis que pagam seus impostos como cidadãos. Será considerado para a avaliação apenas o investimento nos grupos geradores e seus abrigos; dutos externos de biogás e seus acessórios; custo mensal para operação dos geradores.

O valor a ser pago pela energia no Brasil depende da concessionária local, neste caso a COPEL, que pratica a coleta de energia. Para edifícios públicos, o valor médio cobrado é de 0,76 R\$/kWh.

Para melhor compreender as movimentações financeiras sobre determinado investimento, utilizam-se conceitos de matemática financeira. Para melhor detalhamento dos valores que entram e saem do caixa, utiliza-se, dentre outras ferramentas, o *Payback* descontado, que envolve o Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) (NASCIMENTO, 2019).

Para Salomon (2007), o fluxo de caixa é uma ferramenta interessante de análise financeira, pois através dele é possível ver as movimentações financeiras e conhecer, assim, o saldo do investimento no período desejado. Aparecem tanto os valores de entrada quanto de saída.

A avaliação econômica é realizada trazendo os saldos do período para o período zero, ou seja, o estudo é realizado para verificar a viabilidade do

investimento. Para tanto, é utilizado o VPL, que nada mais é uma equação para trazer ao instante inicial o valor, tendo em vista que o dinheiro desvaloriza com o tempo. É representada na equação 9.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \left(\frac{FC_n}{(1+i)^n} \right) - fc_0 \quad (\text{eq. 9})$$

Em que:

- n: período de análise do empreendimento (mês);
- FC_n : fluxo de caixa em cada período (R\$);
- i: taxa de juros (%);
- fc_0 : Valor inicial do investimento (R\$).

Para calcular o valor presente do dinheiro, é necessário utilizar uma taxa de juros para comparar com o lucro que se deseja ter no período. Chamamos esta taxa mínima de atratividade (TMA), no caso de órgãos públicos é comum utilizar a taxa Selic.

Para saber se o projeto é rentável ou não, utiliza-se o conceito de taxa interna de retorno (TIR). Com a finalidade de comparar a taxa utilizada nos cálculos, faz-se uma análise do VPL calculando-se no instante zero a TIR.

A equação 10 mostra o valor economizado pelo município de Cascavel seja calculado ao utilizar a geração distribuída através do biogás do aterro municipal.

$$f_s = P * V_{sh} * h_m \quad (\text{eq. 10})$$

Em que f_s = valor da economia de energia; V_{sh} . = valor da energia de rede, kWh (\$); h_m = horas mensais de trabalho do gerador.

4. Resultados e Discussão

4.1. Monitoramento da qualidade do biogás de aterro

O monitoramento da qualidade do biogás durante o período de teste em 2018 é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Proporção média do biogás estudado.

Mês	CH ₄ (%)	Desvio padrão CH ₄	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO (ppm)	H ₂ S (ppm)
Março	59,2	0,9	39,1	0,7	12	21
Abril	59,4	0,5	40,5	0,1	18	49
Mai	60,3	0,4	39	0,6	15	28
Junho	59,2	0,8	40,3	0	14	36
Julho	59,8	0,5	39,7	0,2	17	42
Agosto	59,9	0,7	39,3	0,6	13	25
Setembro	60,1	0,3	39,2	0,4	12	32
Outubro	59,7	0,4	39,6	0,5	14	44
Novembro	60,1	0,3	39	0,3	15	23
Média	59,7	0,5	39,5	0,4	14,4	33,3
Desvio padrão	0,4	0,6	0,5	0,2	1,9	9,4

O biogás do aterro tem fluxo contínuo e teve uma média de 59,7% de metano e um desvio padrão de 0,4%. Por sua vez, o percentual de outros gases como o CO₂ apresentou uma média de 39,5% do gás, com desvio padrão de 0,5%, O₂ de 0,4% e desvio padrão de 0,2%, medidos em partes por milhão (ppm), gases CO com 14,4ppm e H₂S com 33,3ppm. Percebe-se que, comparado com a literatura, o aterro municipal em estudo tem sua proporção média de biogás considerada alta, pode-se associar o valor de proporção média a eficiência do projeto de tratamento do RSU, que somados à condições climáticas regionais, dá-se em eficiência alta de conversão do material em CH₄.

Em estudo similar de biogás realizado na Turquia (SEVIMOĞLU; TANSEL, 2013), o biogás gerado em idades muito diferentes mediu a concentração de biogás de aterro com um valor médio de 51,4% de CH₄, 42,2% de CO₂, 0,81% de O₂, 4,6% N₂ e menos de 1% com outros gases, como o H₂S. O biogás do aterro sanitário pode ser encontrado com uma concentração de CH₄ de 50 a 70% (HEO; LEE; LIM, 2016; HOO; HASHIM; HO, 2018; KUHN et al., 2017; LOMBARDI; CARNEVALE, 2016).

4.2. Poder calorífico inferior do biogás de aterro

Os testes com os grupos geradores foram realizados e os dados foram compilados na tabela 5. Com base nos dados coletados, foi calculado o poder calorífico Inferior (LHV) do biogás utilizado em cada teste. O grupo gerador 1 em sua média de teste apresentou um LHV de biogás de $6,15 \text{ kWh.m}^{-3}$, considerando que a concentração média foi de 59,8%; enquanto o biogás utilizado pelo grupo gerador 2 apresentou um LHV médio de $6,17 \text{ kWh.m}^{-3}$, considerando que a concentração de metano foi maior, em torno de 60,3%. Embora os dois gasodutos utilizados para o motor sejam de pontos diferentes do aterro, ou seja, de dutos verticais diferentes, o biogás utilizado, com suas proporções de metano verificados e utilizado pelos grupo geradores aplicados ao estudo estatístico de T-Student, mostra que ao nível de 5% de significância o biogás é considerado igual.

O poder calorífico (LHV) do biogás é variável, dependendo da concentração de CH_4 em sua constituição. Assim, quanto maior o seu percentual de gás, maior sua energia. Segundo estudo realizado (NOYOLA; MORGAN-SAGASTUME; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, 2006), o poder calorífico do biogás com 75% de CH_4 , tem um LHV de $7,5 \text{ kWh.m}^{-3}$. Ao analisar o biogás gerado por biodigestores em comunidade no Peru, (FERRER et al., 2011) encontrou-se um LHV de $6,7 \text{ kWh.m}^{-3}$ em gás com uma relação de 63% de metano e 7 kWh.m^{-3} para biogás com 67% metano. Os valores de LHV calculados neste estudo são consistentes com os obtidos nos estudos citados, pois a quantidade de metano presente no biogás deste estudo é menor e, conseqüentemente, apresentou menores valores de poder calorífico inferior. A tabela 5 mostra os dados obtidos para cálculo do poder calorífico inferior do biogás.

Tabela 5. Dados obtidos nos ensaios dos geradores 1 e 2.

Grupo gerador	Potência medida (kW)	consumo Nm^3h^{-1}	temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	metano (%)	Consumo de biogás (m^3h^{-1})	Poder calorífico biogás (kWh.m^{-3})
1	10,0	23,55	20,50	59,80	21,91	6,17
2		22,98	20,10	60,30	21,40	6,15
1	20,0	29,49	20,40	59,80	27,44	6,18
2		28,11	20,60	60,30	26,14	6,15
1	30,0	35,73	20,70	59,80	33,21	6,17
2		33,30	20,80	60,30	30,94	6,15

1		42,14	20,50	59,80	39,20	6,17
2	40,0	39,25	20,80	60,30	36,48	6,15
1		48,70	20,40	59,80	45,32	6,18
2	50,0	45,08	20,80	60,30	41,89	6,15
1		55,55	20,60	59,80	51,65	6,17
2	60,0	51,32	20,80	60,30	47,68	6,15
1		62,07	20,90	59,80	57,66	6,17
2	65,0	54,15	21,03	60,30	50,26	6,15

4.3. Consumo global e específico das unidades geradoras de energia

Através dos ensaios com os grupos geradores 1 e 2, foi possível o respectivo consumo de biogás ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) para as rampas de geração de energia. O gerador 1 teve sua menor potência de 10 kW e o consumo de biogás de $21,91 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, com um consumo específico de biogás de $2,22 \text{ m}^3 \cdot \text{kWh}^{-1}$. O consumo de combustível aumentou à medida que a energia foi solicitada para a geração de eletricidade, tendo um aumento quase constante até sua máxima potência estudada, ou seja, 70 kW para gerador 2, que consumiu $57,66 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de biogás e consumo específico de biogás de $0,82 \text{ m}^3 \cdot \text{kWh}^{-1}$. O biogás utilizado no teste do grupo gerador 1 apresentou uma percentagem média de metano (CH_4) de 59,8%, com 39,7% de dióxido de carbono (CO_2) e gás sulfídrico (H_2S) a 44ppm com 0,5% de O_2 . Os dados de consumo do grupo gerador 1, estão dispostos na figura 8.

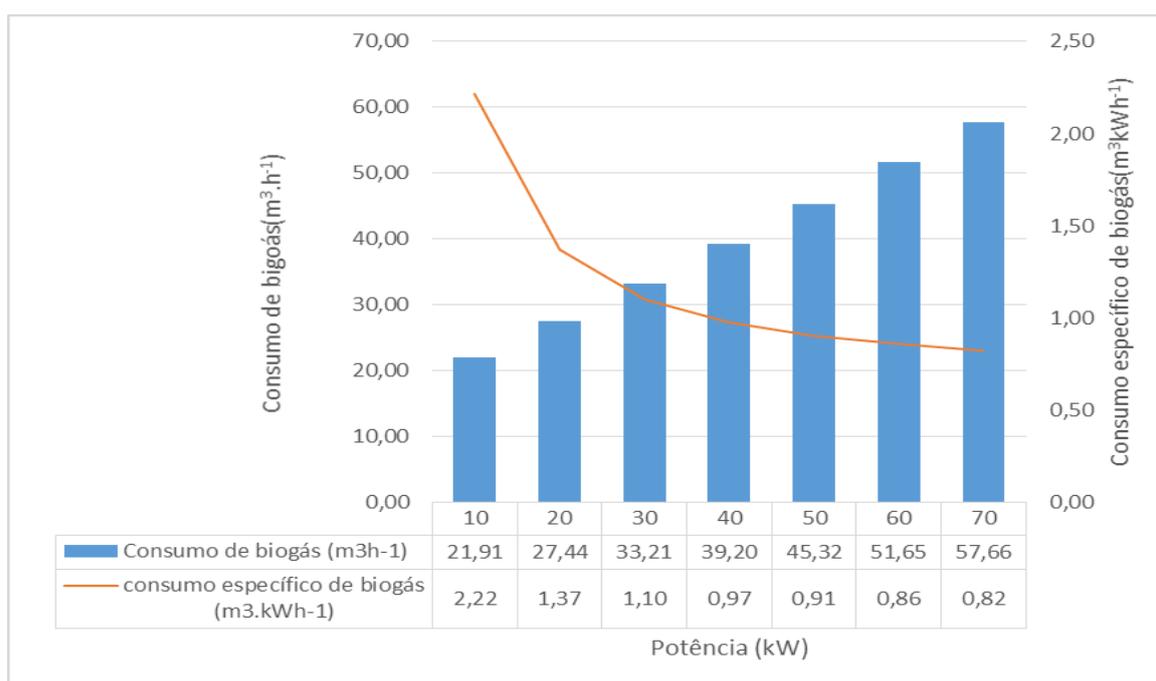


FIGURA 9. Consumo de biogás e consumo específico no grupo gerador 1.

O grupo gerador 2 consumiu $21,40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de biogás para a geração de 10kW, com consumo específico de $2,19 \text{ m}^3 \cdot \text{kWh}^{-1}$. O consumo de biogás para a energia de 65 kW foi de $50,26 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, e o consumo específico de biogás foi de $0,77 \text{ m}^3 \cdot \text{kWh}^{-1}$. O biogás usado neste teste teve uma porcentagem média de metano (CH_4) de 60,3%, com 39,3% para dióxido de carbono (CO_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S) a 28ppm. A figura 9 mostra o consumo de combustível na rampa de energia com o grupo gerador 2.

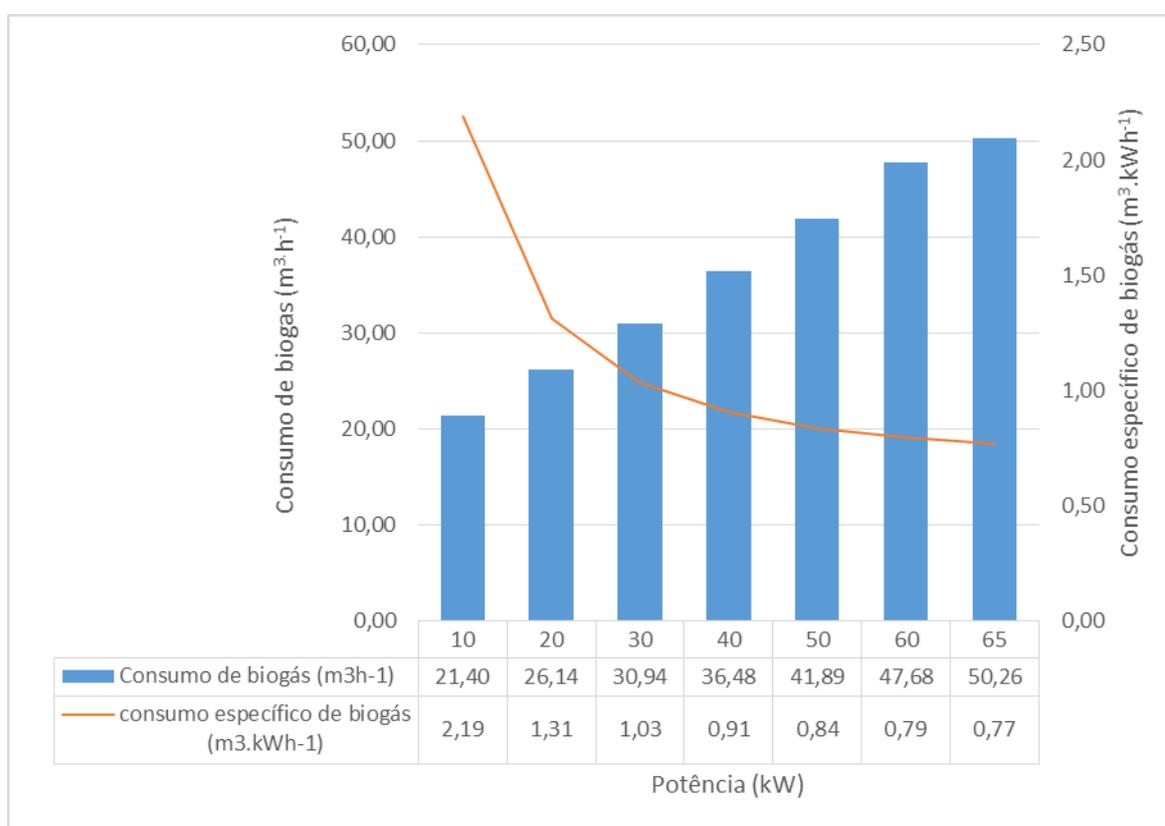


FIGURA 10. Consumo de biogás e consumo específico no grupo gerador 2.

Os dois grupos apresentaram mesma tendência, sendo mais eficientes em potências maiores e tendo menores consumos específicos nessas potências também, mostrando que é interessante sempre trabalhar com o grupo gerador em sua potência nominal. Aplicando o teste de análise de médias de T-Student ao nível de 95% de confiança, não há diferença estatística no consumo de biogás entre os dois grupo geradores. Mas o grupo 2, devido ao limite de injeção na rede a 150kW, e como o grupo gerador 1 já estava em 70kW, foi decidido pelo grupo gerador 1

operar com 65kW por segurança.

Em um estudo similar, um consumo específico de $2,2\text{m}^3.\text{kWh}^{-1}$ para um gerador de 15kW foi verificado para o biog (LANSING et al., 2008). Outro estudo analisando o desempenho de um motor gerador com uma potência nominal de 4kW, obteve um consumo específico de biogás de $1,6\text{m}^3.\text{kWh}^{-1}$ (BARRETO; ALMEIDA; BELCHIOR, 2017). Um estudo com motor ciclo diesel modificado para ciclo Otto, operando com biogás na proporção de 65% de metano, e obteve uma eficiência térmica de 23% (CHANDRA et al., 2011).

Estudo comparando a eficiência calculada e a medição por rede neural em motores operando com biogás a 60% de metano e gerando 4,5kW, teve um consumo médio em torno de $2,3\text{m}^3.\text{kWh}^{-1}$ e eficiência de conversão térmica de cerca de 20% (KURTGOZ; KARAGOZ; DENIZ, 2017).

4.4. Eficiência de conversão de biogás em energia através dos grupos geradores

Com base nos dados coletados pelos testes, foi calculada a eficiência geral dos dois grupos gerados separadamente. O conjunto 1 teve uma eficiência energética de 17,95% com 100% de carga, e 16,3% para 50% da carga plena. Sua menor eficiência foi para a carga de 10 kW, sendo a eficiência energética de 6,74%.

O grupo gerador 2 apresentou maior eficiência na potência de 65kW, chegando a 19,13%. Com 50% de sua carga máxima, a eficiência foi de 17,67%. A menor eficiência, de 6,92%, ficou para a menor carga, a de 10kW. Aplicando-se o teste de T-student ao nível de 95% de confiança, temos que as médias são estatisticamente iguais.

Karapidakis et al. (2010) mostraram, em seu estudo, que os motores de combustão interna têm eficiência de cerca de 25-30% quando usados como combustível de biogás de aterro. Outros estudos utilizando geradores de biogás de esterco de porco com um grupo gerador bicomcombustível (diesel e biogás) tiveram uma eficiência de 23% (CACUA et al., 2016). Um pequeno gerador de 1,6kW teve 21% de eficiência também com biogás de esterco de porco (PIPATMANOMAI; KAEWLUAN; VITIDSANT, 2009).

Contudo, (BARRETO; ALMEIDA; BELCHIOR, 2017) com um gerador de 4 kW, obteve uma eficiência máxima de 14% em 100% de carga, com menores eficiências em cargas menores no gerador.

Tabela 6. Eficiência global energética dos grupo geradores 1 e 2.

Potência gerada (kW)	10	20	30	40	50	60	65	70
Eficiência motor 1 (%)	6,74	10,75	13,3	15,03	16,3	17,12		17,95
Eficiência motor 2 (%)	6,92	11,29	14,4	16,21	17,67	18,58	19,13	

Apesar de ser renovável quando comparado a outros combustíveis, o biogás tem baixo LHV, exigindo sistemas mais eficientes para sua conversão em outras energias ou sendo usado em motores que não tenham sido dimensionados diretamente para tê-lo como combustível. Estes podem ter menor eficiência, ou até mesmo exigir a mistura com outros combustíveis para aumentar o desempenho (NIKPEY et al., 2014).

O sistema possui perda de eficiência em razão de rolamentos e outros elementos mecânicos que tem perda de energia por atrito e, até mesmo, o gerador que tem sua eficiência de conversão de energia de 91,10% segundo o fabricante. A eficiência do motor acaba sendo maior, e, para que possamos conhecer sua eficiência, utilizamos a eq. 7. Os Dados são informados na tabela 7. Os motores tiveram maior eficiência para a maior potência, tendo a menor eficiência para a potência de 10kW requerida pelo sistema gerador.

Tabela 7. Eficiência energética dos motores acoplados aos geradores 1 e 2 em faixas de potência.

. potência (kW)	10	20	30	40	50	60	65	70
Eficiência motor grupo gerador 1	7,4	11,8	14,6	16,5	17,9	18,8		19,7
Eficiência motor grupo gerador 2	7,6	12,4	15,8	17,8	19,4	20,4	21,0	

4.5. Emissão de NOx

Nos ensaios realizados com os grupo geradores utilizando biogás do aterro sanitário, há uma nítida tendência de aumento de emissão de NO_x conforme aumenta a potência gerada. O grupo gerador 1 teve sua menor emissão para a potência de 10kW com 33 ppm de NO_x; já a sua maior emissão foi para a maior potência gerada, a de 70kW, com 476ppm.

O grupo gerador 2 teve também a mesma tendência do grupo gerador 1, com maiores emissões para cargas de energia gerada maiores, na qual a menor emissão foi para a potência de 10kWh, com 42ppm de NO_x; a maior emissão, que foi de 496ppm, ficou para a potência de 70kW. A figura 8 mostra o comportamento da emissão para os 2 grupo geradores. Segundo o teste de T-student, os dois grupo geradores possuem emissão de NO_x estatisticamente iguais ao nível de confiança de 95%. A figura 10 mostra a emissão por cada grupo gerador.

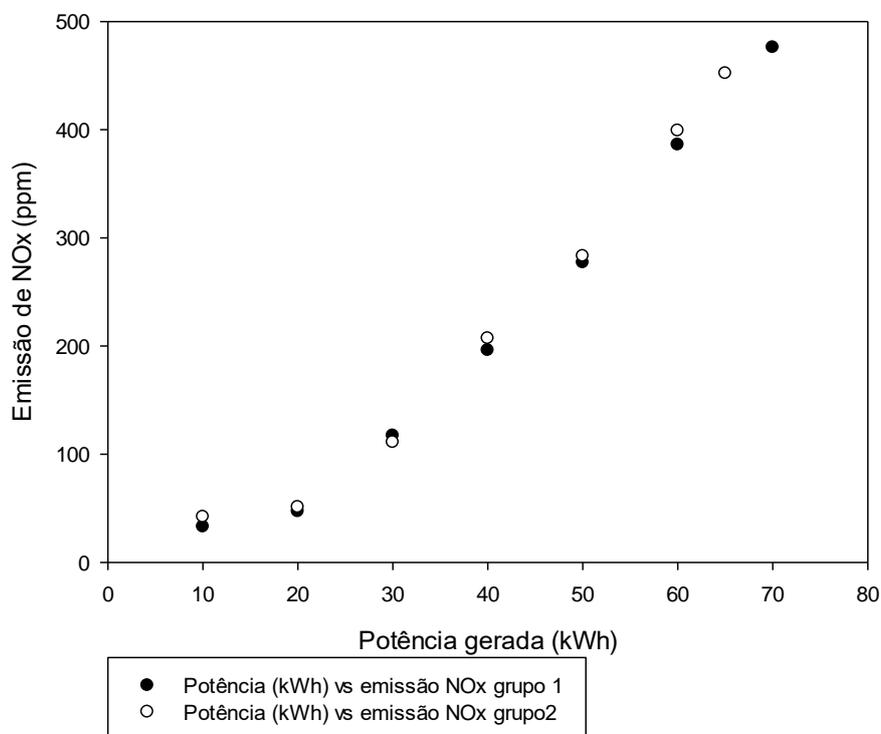


FIGURA 11. Comparativo de emissão de NO_x pelos grupo geradores 1 e 2, quando gerando potência de energia elétrica.

Fonte: o autor

Trabalho realizado por Jeong et al. (2009), em que houve o emprego de blindas de biogás e hidrogênio em motor de combustão interna mostrou que quanto maior a temperatura de queima, maior foi a emissão de NO_x. Porém, o mesmo trabalho mostrou que quanto maior a temperatura, menor foi a emissão de CO₂, descrevendo que foi em razão de queima melhor de poder calorífico da blenda ficar maior com concentrações maiores de H₂.

Em estudo de geração de energia elétrica com biogás empregado em motor

de combustão interna, ciclo diesel com 1,9l e sistema de aspiração forçada, modificado com inserção de velas para centelhamento e sistema de injeção de gás, obteve resultados de baixa emissão de Nox, com limite de $0,27\text{g.kWh}^{-1}$ (BEDOYA et al., 2012).

Teixeira (2010) em estudo de emissões com motor ciclo diesel marca Agrale M95, utilizando blendas de diesel com biodiesel de palma, obtiveram a mesma tendência de emissão de NO_x , tendo maiores emissões para potências mais elevadas, quando comparada com potências de motor menores.

4.6. Temperatura dos gases de escape

Verificou-se que a temperatura tem a tendência de ser maior para maiores cargas solicitadas ao motor, sendo normal em razão de maior entalpia envolvida no sistema. Segundo a estatística de t-student, os dois motores tiveram as médias iguais para a temperatura ao nível de 5%, como é mostrado na figura 11.

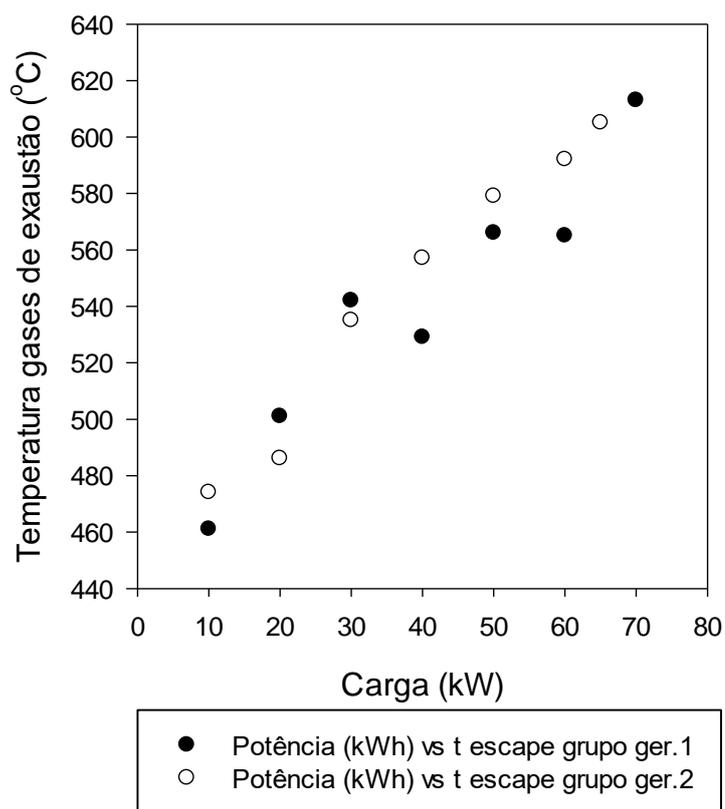


FIGURA 12. Temperatura dos gases de escape dos dois grupos geradores em estudo.

Fonte: o autor

Vê-se que a temperatura dos gases de exaustão é elevada. Dada a necessidade em aumentar a eficiência dos projetos de geração de energia, é interessante que esta temperatura seja utilizada em conjunto a outro processo de geração de energia, como, por exemplo, caldeiras ou sistemas de geração de energia por turbinas à vapor. Segundo Carvalho (2005), a utilização da cogeração pode trazer uma redução de até 16% de combustível para a geração total de energia; podendo chegar a um eficiência geral de até 70%.

4.7. Emissão de CO

Nos ensaios de geração de energia elétrica com os grupos geradores do aterro sanitário, as análises de emissão de CO não mostraram uma tendência clara. A estatística afirma que as médias aplicadas ao teste T-student com 95% de probabilidade mostram que os dados são estatisticamente iguais. A figura 12 apresenta a emissão de CO por cada grupo gerador em estudo.

Barreto (2016), Em ensaio de grupo motogerador estacionário com capacidade de 5kW, com a finalidade de estudar seu consumo e emissões, observou que o biogás e o GNV, emitem cerca de 75% menos CO que utilizando a gasolina como combustível.

A queima incompleta tem como resultado a emissão de monóxido de carbono (CO). A temperatura mais elevada em razão de cargas mais acentuadas para o motor acaba por promover queima mais completa e, assim, resulta em menor emissão quando comparada a cargas mais baixas (KIVEVELE et al., 2011).

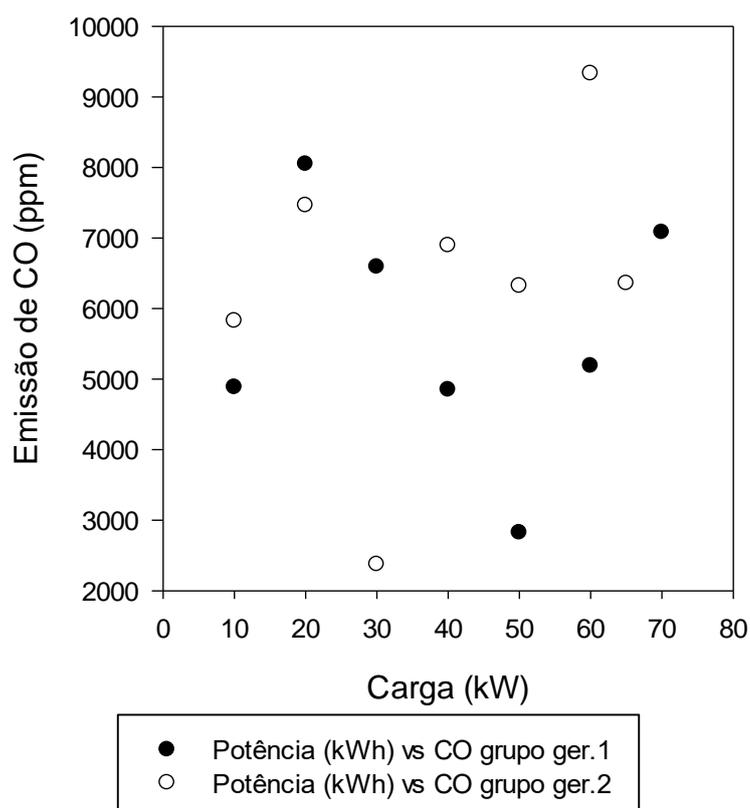


FIGURA 13. Comportamento da emissão de CO dos dois grupos geradores estudados.

Fonte: o autor

4.8. Emissão de SO₂

A formação de SO_2 é proveniente do enxofre (S) que está presente no combustível e da razão ar-combustível (SILVA, 2016). Percebe-se que os dois grupo geradores tiveram a emissão de SO_2 dentro da faixa de 22 a 42ppm, não apresentando tendência clara nos dados. Tais valores emitidos têm a semelhança com os valores percentuais de H_2S presente no gás combustível, tendo média de 33ppm com desvio padrão de 9ppm. A figura 13 mostra o comportamento da emissão deste elemento químico.

Pesquisa realizada por Teixeira e Cristiano (2005) com grupo motogerador de 18kW, utilizando como combustível biogás de biomassa, filtrado, com 80 % de CH_4 , e menos de 1ppm de H_2S , teve como resultado a emissão de aproximadamente 1ppm de SO_2 .

Segundo o teste de T-student, as duas médias de emissão de SO_2 pelos grupo geradores 1 e 2, a 95% de probabilidade, são estatisticamente iguais. Logo, os dois motores tiveram emissões semelhantes de SO_2 .

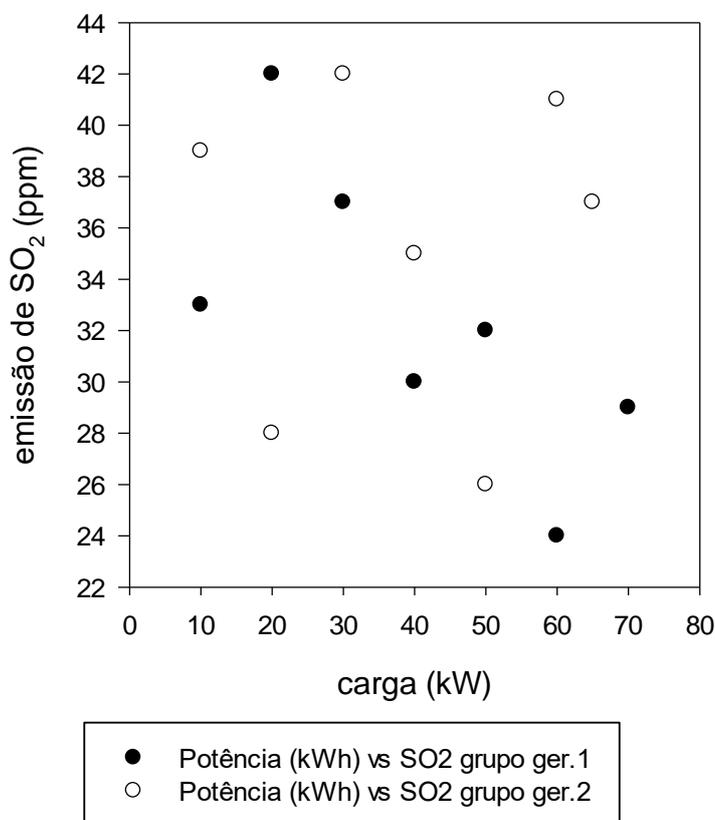


FIGURA 14. Emissão de SO_2 pelos dois grupos geradores.

Fonte: o autor

4.9. Avaliação econômica da conversão do biogás de aterro em energia

O projeto executado teve um investimento inicial de R\$ 441.080,00, já incluso os 2 grupos geradores, toda a rede de gasodutos, válvulas e demais acessórios para a operação do sistema. A Tabela 8 mostra o detalhamento do investimento dos geradores com os dutos de gás.

Tabela 8. Descrição dos itens do projeto e seu valor de investimento para implementação do sistema de geração distribuída em aterro já existente.

	quantidade	valor unitário	total (R\$)
tubo pvc 60 mm (m)	250	58	14.500,00
conexões (unidade)	85	43	3.655,00
Registros	30	22,5	675,00
consumíveis	40	25	1.000,00
grupo gerador (unidade)	2	160000	320.000,00
cabos de condução de energia	50	25	1.250,00
Abrigo	1	60000	60.000,00
Projeto	1	40000	40.000,00
		Total(R\$)	441.080,00

A operação do sistema necessita de investimentos mensais para o pleno funcionamento. Serão contabilizados dois trabalhadores para operar o sistema, além de um valor que é direcionado para eventuais manutenções, decorrentes de falhas ou desastres naturais. Os valores são descritos na tabela 9.

Tabela 9. Descrição dos custos mensais para plena execução do sistema.

desc.	quantidade	valor unitário	total (R\$)
manutenção mensal	1	5500,00	5500,00
salário empregado (mensal)	2	3000,00	6000,00
		total (R\$)	11500,00

A avaliação econômica do projeto de geração de energia elétrica instalado no aterro sanitário mostrou que é viável a implantação do projeto, tendo uma taxa interna de retorno (TIR) de 2%, número maior que o da taxa selic mensal proposta pelo Banco Central. O período de retorno do valor investido é de 9 meses.

Considerando que serão 27 dias de operação dos geradores, com uma potência média de 135kWh, esses dados aplicados à equação 9 mostram que a economia média mensal por município no ano de 2018 foi de R\$ 66.184,8/mês. O custo mensal de operação do sistema é de R\$ 11.500,00. A tabela 10 apresenta a avaliação econômica realizada em torno do investimento da geração de energia elétrica e injeção na rede de energia no aterro sanitário em estudo.

Tabela 10. Avaliação econômica da implementação do investimento

Mês	valor investido (R\$)	custo mensal	desvalorização equip. (R\$)	retorno (R\$)	TMA (%)	VPL	saldo	percentual recuperado
0	-441080	0	0	0	0,00375	-441080	-441080	0,0%
1	0	-11500	-3969,72	66184,8	0,00375	54437,54	-386642	12,3%
2	0	-11500	-3933,99252	66184,8	0,00375	54191,2	-332451	24,6%
3	0	-11500	-3898,586587	66184,8	0,00375	53945,78	-278505	36,9%
4	0	-11500	-3863,499308	66184,8	0,00375	53701,27	-224804	49,0%
5	0	-11500	-3828,727814	66184,8	0,00375	53457,68	-171347	61,2%
6	0	-11500	-3794,269264	66184,8	0,00375	53215	-118132	73,2%
7	0	-11500	-3760,120841	66184,8	0,00375	52973,23	-65158	85,2%
8	0	-11500	-3726,279753	66184,8	0,00375	52732,36	-12426	97,2%
9	0	-11500	-3692,743235	66184,8	0,00375	52492,39	40066	109,1%

5. Conclusão

A implementação do projeto de geração de energia elétrica com biogás de aterro sanitário mostrou-se satisfatório. Além de mitigar o impacto ambiental que seria causado pelo metano na atmosfera, ainda gera saldo positivo de energia elétrica junto à concessionária, o que levou a economia do município com energia elétrica, com saldo positivo de R\$ 54.684,80 que é utilizado como crédito de energia elétrica em escolas e hospitais do município.

A transformação da energia presente no biogás do aterro através dos geradores utilizados mostrou-se viável economicamente. Os geradores apresentaram resultados com consumo específico para cada faixa de potência, e quanto maior a potência gerada, menor o consumo específico e maior a eficiência do grupo gerador, atingindo uma eficiência média de conversão de energia de 18,97%. A mesma faixa de potência máxima forneceu um consumo específico médio de biogás de $0,8\text{m}^3.\text{kWh}^{-1}$, mostrando que a melhor faixa de trabalho dos geradores é a de potência nominal. O biogás utilizado teve apenas a remoção de umidade por condensação, atingindo baixos valores de H_2S ($22\text{-}47\text{cm}^3.\text{m}^{-3}$), sem corrosão aparente no sistema, provando ser viável na geração de eletricidade.

6. Referências Bibliográficas

- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**. [s.l: s.n.].
- AGAMUTHU, P. Landfilling in developing countries. **Waste Management and Research**, v. 31, n. 1, p. 1–2, 2013.
- AKUJIEZE, C. N., AND IDEHAI, I. M. Standardization of The Electricity and Economic Potentials of Landfill Gas (LFG) in Lagos , Nigeria. **International Journal of Science and Engineering (IJSE)**, v. 7, n. July, p. 1–9, 2014.
- ANDRADE, G. R. Gestão de resíduos sólidos urbanos: aterro sanitário de uberlândia-mg. **V Simpósio Sobre Resíduos Sólidos**, v. 1, n. 2014, p. 1–6, 2017.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Estabelece Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma descentralizada** Brasília - Brazil, 2015.
- ANP. **RESOLUÇÃO Nº 685 de 26.09.2017**, 2017.
- ARKHAROV, I. A.; SIMAKOVA, E. N.; NAVASARDYAN, E. S. Landfill Gas as Feedstock for Energy and Industrial Processes. **Chemical and Petroleum Engineering**, v. 52, n. 7–8, p. 547–551, 2016.
- BARRAGÁN-ESCADÓN, A. et al. Electricity production using renewable resources in urban centres. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy**, v. 171, n. 1, p. 12–25, 2018.
- BARRETO, VICTOR VASCONCELOS. **ANÁLISE DE DESEMPENHO E EMISSÕES DE UM MOTOR GERADOR OPERANDO COM BIOGÁS**. [s.l: s.n.].
- BARRETO, V. V.; ALMEIDA, S. C. A.; BELCHIOR, C. R. P. Análise de desempenho e de emissões em um motor de combustão interna alimentado com biogás. **Acta Mechanica et Mobiletatem**, v. 2, n. 1, p. 39–44, 2017.
- BEDOYA, I. D. et al. Experimental study of biogas combustion in an HCCI engine for power generation with high indicated efficiency and ultra-low NO x emissions. v. 53, p. 154–162, 2012.
- BERTINATTO, R. et al. Analysis of lubricant oil contamination and degradation and wear of a biogas-fed otto cycle engine. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 39, n. 4, p. 409, 2017.
- BRAZIL. **Senso Demográfico brasileiro**. [s.l: s.n.].
- CACUA, K. et al. Experimental evaluation of a diesel-biogas dual fuel engine operated on micro-trigeneration system for power, drying and cooling. **Applied Thermal Engineering**, v. 100, p. 762–767, 2016.
- CARVALHO, F. **critérios de racionalidade energética na qualificação de centrais geradoras**. BRASIL: [s.n.].
- CAVALLET, L. E.; NETO, P. F. Metais pesados no rejeito e na água em área de descarte de resíduos sólidos urbanos Heavy metals in the waste and in the water discharge area of municipal solid waste. v. 8, n. Cd, 2013.
- CHANDRA, R. et al. Performance evaluation of a constant speed IC engine on CNG, methane enriched biogas and biogas. **Applied Energy**, v. 88, n. 11, p. 3969–3977, 2011.
- CHAUDHARI, A. J. et al. Combined impact of compression ratio and re-circulated exhaust gas on the performance of a biogas fueled spark ignition engine. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 11, n. 1, 2019.
- COELHO, S. T. A conversão da fonte renovável biogás em energia. n. February, 2015.
- ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2003.
- FEILBERG, A. et al. Odorant emissions from intensive pig production measured by online proton-transfer-reaction mass spectrometry. **Environmental Science and Technology**, 2010.
- FERRER, I. et al. Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 1668–1674, 2011.
- GEWALD, D. et al. Waste heat recovery from a landfill gas-fired power plant. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 4, p. 1779–1789, 2012.
- GRABSKI, M. A. N. **Caracterização da mistura e análise numérica do comportamento**

da injeção de biogás em rede de gás natural. [s.l: s.n.].

GUIMARÃES, C. M. M.; GALVÃO, V. Análise da rede de colaboração científica sobre biogás. **Perspectivas em Ciência da Informação**, 2015.

GUPTA, S. K.; MITTAL, M. Effect of Compression Ratio on the Performance and Emission Characteristics, and Cycle-to-Cycle Combustion variations of a Spark-Ignition Engine Fueled with Bio-methane Surrogate. **Applied Thermal Engineering**, p. 1440–1453, 2019.

HE, R.; SU, Y.; KONG, J. Characterization of trichloroethylene adsorption onto waste biocover soil in the presence of landfill gas. **Journal of Hazardous Materials**, v. 295, p. 185–192, 2015.

HEO, J.; LEE, B.; LIM, H. Techno-economic analysis for CO₂ reforming of a medium-grade landfill gas in a membrane reactor for H₂ production. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2585–2593, 2016.

HIRANO, M. Y.; SILVA, C. L. DA. Dairy Cattle Biogas Usage in Microturbines for Energy Generation and Thermal Exploitation. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 4, p. 526–535, 2018.

HOO, P. Y.; HASHIM, H.; HO, W. S. Opportunities and challenges: Landfill gas to biomethane injection into natural gas distribution grid through pipeline. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 409–419, 2018.

HOTTA, S. K.; SAHOO, N.; MOHANTY, K. Comparative assessment of a spark ignition engine fueled with gasoline and raw biogas. **Renewable Energy**, v. 134, p. 1307–1319, 2019.

JEON, Y.-W.; LEE, D.-H. Gas Membranes for CO₂/CH₄ (Biogas) Separation: A Review. **Environmental Engineering Science**, v. 32, n. 2, p. 71–85, 2015.

JEONG, C. et al. Generating efficiency and emissions of a spark-ignition gas engine generator fuelled with biogas – hydrogen blends. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 23, p. 9620–9627, 2009.

JOSEPH, J.; KUNTIKANA, G.; SINGH, D. N. Investigations on gas permeability in porous media. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, p. 81–92, 2019.

JUNG, S. Y.; PARK, J. Numerical prediction of effects of CO₂ or H₂ content on combustion characteristics and generation efficiency of biogas-fueled engine generator. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 27, p. 16991–16999, 2017.

JUNIOR, O. M. C.; FERREIRA, R. C.; SIQUEIRA, R. F. Estudo de viabilidade de ampliação e expansão de aterro sanitário no município de Nova Esperança - Paraná Expansion of feasibility study and sanitary landfill expansion in Nova Esperança - Paraná. p. 774–791, 2017.

KARAPIDAKIS, E. S. et al. Energy efficiency and environmental impact of biogas utilization in landfills. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 7, n. 3, p. 599–608, 2010.

KIVEVELE, T. T. et al. Engine performance, exhaust emissions and combustion characteristics of a CI engine fuelled with croton megalocarpus methyl ester with antioxidant. **Fuel**, v. 90, n. 8, p. 2782–2789, 2011.

KOPANOS, G. M.; GEORGIADIS, M. C.; PISTIKOPOULOS, E. N. Energy production planning of a network of micro combined heat and power generators. **Applied Energy**, v. 102, p. 1522–1534, 2013.

KORAKIANITIS, T.; NAMASIVAYAM, A. M.; CROOKES, R. J. Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 37, n. 1, p. 89–112, 2011.

KREITH, F.; TCHOBANOGLIOUS, G. **Handbook of Solid Waste Management.** [s.l: s.n.].

KUHN, J. N. et al. Requirements, techniques, and costs for contaminant removal from landfill gas. **Waste Management**, v. 63, p. 246–256, 2017.

KURTGOZ, Y.; KARAGOZ, M.; DENIZ, E. Engineering Science and Technology, an International Journal Biogas engine performance estimation using ANN. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 20, n. 6, p. 1563–1570, 2017.

LANSING, S. et al. Quantifying electricity generation and waste transformations in a low-cost, plug-flow anaerobic digestion system. **Ecological Engineering**, v. 34, n. 4, p. 332–348,

2008.

- LEE, U.; HAN, J.; WANG, M. Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 335–342, 2017.
- LEME, M. M. V. et al. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 87, p. 8–20, 2014.
- LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E. A. Analysis of an innovative process for landfill gas quality improvement. **Energy**, v. 109, p. 1107–1117, 2016.
- LOU, X. F.; NAIR, J. The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions - A review. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 16, p. 3792–3798, 2009.
- MAC KINNON, M. A.; BROUWER, J.; SAMUELSEN, S. **The role of natural gas and its infrastructure in mitigating greenhouse gas emissions, improving regional air quality, and renewable resource integration** *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018.
- MANFREN, M.; CAPUTO, P.; COSTA, G. Paradigm shift in urban energy systems through distributed generation : Methods and models. **Applied Energy**, v. 88, n. 4, p. 1032–1048, 2011.
- MARCULESCU, C.; CENUȘĂ, V.; ALEXE, F. Analysis of biomass and waste gasification lean syngases combustion for power generation using spark ignition engines. **Waste Management**, v. 47, p. 133–140, 2016.
- MELO, S. V. S. DE. **Estudo da Integração de uma Célula Combustível a Óxido Sólido Com Uma Microturbina a Gás.** [s.l: s.n.].
- MIHIC, S. Biogas Fuel for Internal Combustion Engines. **Annals of the Faculty of Engineering Hunedora**, v. 2, n. 3, p. 12, 2004.
- MIRHAJI, V. et al. Seismic in-Soil Isolation of Solid Waste Landfill Using Geosynthetic Liners: Shaking Table Modeling of Tehran Landfill. **International Journal of Civil Engineering**, v. 17, n. 2, p. 205–217, 2019.
- MORENO, A. I. et al. Chemical characterization of emissions from a municipal solid waste treatment plant. **Waste Management**, v. 34, n. 11, p. 2393–2399, 2014.
- NASCIMENTO, M. **AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE PARA EMPREENDIMENTOS DO AGRONEGÓCIO.** [s.l.] Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2019.
- NELSON, J. et al. Thermodynamic modeling of solarized microturbine for combined heat and power applications. **Applied Energy**, v. 212, n. November 2017, p. 592–606, 2018.
- NIKPEY, H. et al. Experimental evaluation and ANN modeling of a recuperative micro gas turbine burning mixtures of natural gas and biogas. **Applied Energy**, v. 117, p. 30–41, 2014.
- NISKANEN, A. et al. Enhancing landfill gas recovery. **Journal of Cleaner Production**, v. 55, n. February 2010, p. 67–71, 2013.
- NOCK, W. J. et al. Modeling the water scrubbing process and energy requirements for CO₂ capture to upgrade biogas to biomethane. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 32, p. 12783–12792, 2014.
- NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: Odor control and energy/resource recovery. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 5, n. 1, p. 93–114, 2006.
- PAGLIACCIA, P. et al. Variability of food waste chemical composition : Impact of thermal pre-treatment on lignocellulosic matrix and anaerobic biodegradability. **Journal of Environmental Management**, v. 236, n. April 2018, p. 100–107, 2019.
- PALMA, V.; BARBA, D. H₂S purification from biogas by direct selective oxidation to sulfur on V₂O₅-CeO₂ structured catalysts. **Fuel**, v. 135, p. 99–104, 2014.
- PANEPINTO, D. et al. Environmental Performances and Energy Efficiency for MSW Gasification Treatment. **Waste and Biomass Valorization**, v. 6, n. 1, p. 123–135, 2014.
- PANTALEO, A. M.; CAMPOREALE, S.; SHAH, N. Natural gas e biomass dual fuelled

microturbines : Comparison of operating strategies in the Italian residential sector. **Applied Thermal Engineering**, 2013.

PIPATMANOMAI, S.; KAEWLUAN, S.; VITIDSANT, T. Economic assessment of biogas-to-electricity generation system with H₂S removal by activated carbon in small pig farm. **Applied Energy**, v. 86, n. 5, p. 669–674, 2009.

PRAKASH, J. et al. 10.1016/j.expthermflusci.2013.12.008. v. 8, n. 3, p. 12, 2016.

RABONI, M.; URBINI, G. Production and use of biogas in Europe: a survey of current status and perspectives. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, 2014.

RASI, S.; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, J. **Trace compounds affecting biogas energy utilisation - A review** **Energy Conversion and Management**, 2011.

REGATTIERI, C. R.; CARLOS, S. Æ. O. QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO. 2009.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. **Techniques for transformation of biogas to biomethane** **Biomass and Bioenergy**, 2011.

SALOMON, K. R. Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecn. 2007.

SÁNCHEZ, C. et al. Comparison of modeling with empirical calculation of diffuse and fugitive methane emissions in a Spanish landfill. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 69, n. 3, p. 362–372, 2019.

SCHIRMER, W. N. et al. Methane production in anaerobic digestion of organic waste from recife (Brazil) landfill: Evaluation in refuse of diferent ages. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 31, n. 2, p. 373–384, 2014.

SÉRGIO, P. et al. Experimental Study on Applying Biomass-derived Syngas in a Microturbine. **Applied Thermal Engineering**, 2018.

SEVIMOĞLU, O.; TANSEL, B. Composition and source identification of deposits forming in landfill gas (LFG) engines and effect of activated carbon treatment on deposit composition. **Journal of Environmental Management**, v. 128, p. 300–305, 2013.

SHEN, S. et al. Methane hotspot localization and visualization at a large-scale Xi'an landfill in China: Effective tool for landfill gas management. **Journal of Environmental Management**, v. 225, n. August, p. 232–241, 2018.

SILVA, DEBORA SOARES. ENERGÉTICA NA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE POR TERMOGERAÇÃO , UTILIZANDO MOTORES DO CICLO DIESEL . 2016.

SILVA, F. P. **Eficiencia energética de uma unidade de microgeração de energia elétrica a partir do biogás da suinocultura**. [s.l: s.n.].

STATE, K.; STATE, O.; TAKZIM, J. D. Application of the Triangular Model in Quantifying Landfill Gas Emission from Municipal Solid Wastes. v. 5, n. 1, p. 71–80, 2019.

TEIXEIRA, CLAUDIO VIDAL. ANÁLISE DE EMISSÕES E DESEMPENHO DE MOTORES DIESEL UTILIZANDO ÓLEO DIESEL COMERCIAL , BODIESEL DE PALMA (B100) E MISTURAS (BX). 2010.

TEIXEIRA, S.; CRISTIANO, O. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE ESGOTO . **AGRENER**, p. 10, 2005.

VON, M. K. **Engines for Biogas**. [s.l.] Eschborn: GTZ, 1988.

Y.A., Ç.; M.A., B. **Termodinâmica**. 7. ed. [s.l.] Mcgrawhill, 2013.

YANG, Y.; ZHANG, P.; LI, G. **Regional differentiation of biogas industrial development in China** **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2012.

YONG, L. L. Geotechnical Assessment of Malaysian Residual Soils for Utilization As Clay Liners in Engineered Landfills. **International Journal of GEOMATE**, v. 16, n. 58, p. 20–25, 2019.

ZHANG, H. et al. Emission of volatile sulfur compounds during composting of municipal solid waste (MSW). **Waste Management**, 2013.

ZHENG, X. et al. Hydrogen and syngas production from municipal solid waste (MSW)

gasification via reusing CO₂. **Applied Thermal Engineering**, v. 144, n. October 2017, p. 242–247, 2018.