

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS**

CAMPUS PALMAS

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RAISSA RIBEIRO DA SILVA

**REMOÇÃO DE CO₂ DE BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO EMPREGANDO
PROCESSO DE ABSORÇÃO COM SOLUÇÃO DE Ca(OH)₂**

PALMAS

2022

RAISSA RIBEIRO DA SILVA

**REMOÇÃO DE CO₂ DE BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO EMPREGANDO
PROCESSO DE ABSORÇÃO COM SOLUÇÃO DE Ca(OH)₂**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Bacharelado em Engenharia Civil,
Instituto Federal do Tocantins – Campus
Palmas, como exigência a obtenção do
grau em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

PALMAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

S586r Silva, Raissa Ribeiro da
Remoção de CO₂ de biogás de aterro sanitário empregando processo de absorção com solução de Ca(OH)₂ / Raissa Ribeiro da Silva. – Palmas, TO, 2022.

45 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2022.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Metano. 2. Aterro Sanitário. 3. Purificação do biogás. I. Pedroza, Marcelo Mendes. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

RAISSA RIBEIRO DA SILVA

REMOÇÃO DE CO₂ DE BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO EMPREGANDO
PROCESSO DE ABSORÇÃO COM SOLUÇÃO DE Ca(OH)₂

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Bacharelado em Engenharia Civil,
Instituto Federal do Tocantins –
Campus Palmas, como exigência a
obtenção do grau em Engenharia Civil.

Aprovado em: 15/12/2022

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza (Orientador)

IFTO – *Campus Palmas*



Profa. Dra. Elaine da Cunha Silva Paz

IFTO – *Campus Palmas*



Prof. MSc. Antonio Adelúzio Gomes de Azevedo

Instituto Vinte de Maio

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer os meus pais, Pedro Antônio e Maria Takisvânia, pelo amor incondicional e incentivo aos estudos desde a infância, dando todo apoio e suporte necessário. Obrigada por sempre acreditarem em mim, sem vocês nada disso seria possível.

A minha família, em especial a minhas irmãs, tias e avós, o apoio a mim prestado foi fundamental para a conclusão do curso.

Ao meu amado companheiro Erik, todo o seu carinho e incentivo durante essa jornada me deu forças para continuar. Obrigada pela sua paciência e compreensão.

Aos meus amigos Amanda, Gyselle e Eleomar, por terem me acompanhado nesse percurso e serem luz em minha vida. Obrigada por nunca terem largado a minha mão mesmo nos meus piores momentos. A vocês tenho minha eterna gratidão.

Ao meu professor orientador Dr. Marcelo Mendes Pedroza por acreditar neste trabalho e ser um exemplo de pessoa e profissional, o qual irei sempre buscar inspiração.

A professora Dra. Elaine e o professor MSc. Antonio Adelúzio por terem se prontificado a participarem desta banca e pelas valiosas contribuições.

Ao Instituto Federal do Tocantins, campus Palmas, pela oportunidade que me foi dada de formação no curso superior de bacharel em engenharia civil, oferecendo estrutura adequada com professores qualificados e dedicados.

Por fim, agradeço a todos que passaram pela minha vida durante esse período. A todos que me ajudaram de qualquer forma, vocês foram extremamente essenciais para a construção de quem sou hoje, meus mais sinceros, obrigada!

RESUMO

Um dos principais problemas relacionado a prática do Aterro Sanitário, consiste na emissão descontrolada de biogás contido nos resíduos sólidos urbanos. O biogás é composto aproximadamente de 45 a 60% de metano e 35 a 50% de dióxido de carbono, compostos responsáveis pelo efeito estufa. O CH_4 pode ser usado para aproveitamento energético devido seu alto poder calorífico, para isso, se faz necessário a remoção de CO_2 , visto que este afeta a capacidade calorífica do metano. Nesse sentido, essa pesquisa tem como objetivo avaliar a remoção de CO_2 do biogás oriundo do Aterro Sanitário de resíduos sólidos urbanos no município de Palmas - Tocantins, empregando um sistema de lavador de gases de baixo custo com adição de aditivos na água de lavagem, submetidos a variações construtivas e operacionais. A medição de fluxo (perfil diário) do biogás foi realizado através de um dreno vertical localizado em uma das células do Aterro Sanitário. A medição de vazão do biocombustível foi realizada através de um medidor de gás GLP Predial. Os testes de purificação do biogás foram realizados através de um lavador de gases seguido por uma coluna de absorção, sendo empregado soluções de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 a 0,12 mol/L, 0,17 mol/L e 0,22 mol/L e uma variação de solução entre 300 a 600 L/h para a retirada do CO_2 . Para a concretização do objetivo dessa pesquisa foram desenvolvidas seguintes etapas metodológicas: (a) medição do fluxo, (b) coleta e análise da amostra do biogás, (c) testes experimentais. Foi aferida uma vazão diária de biogás de 4m^3 . Os resultados obtidos demonstraram valores de concentração de metano variando entre 70 a 89%. O maior valor da concentração de metano (86%) foi encontrado utilizando 600 L/h de vazão de solvente e 0,17 e 0,22 mol/L para variação de concentração de absorvente. Com esses mesmos parâmetros foi alcançado o maior valor do poder calorífico do biogás, de 7700 Kcal/m^3 . Sendo assim, foi percebido que para obter maiores valores de concentração de metano e seu poder calorífico, depende majoritariamente da vazão da solução enquanto a concentração do absorvente exerce uma influência mínima nos resultados.

Palavras-chave: Metano. Aterro Sanitário. Remoção de CO_2 . Purificação do biogás. Lavador de gases.

ABSTRACT

One of the main problems related to the practice of landfilling is the uncontrolled emission of biogas contained in urban solid waste. Biogas are composed of approximately 45 to 60% methane and 35 to 50% carbon dioxide, compounds responsible for the greenhouse effect. CH₄ can be used for energy use due to its high calorific value, for this, it is necessary to remove CO₂, since this affects the heat capacity of methane. In this sense, this work aims to evaluate the removal of CO₂ from biogas from the Sanitary Landfill of urban solid waste in the municipality of Palmas - Tocantins, using a low-cost prototype of a gas scrubber with the addition of additives in the washing water, treated to constructive variations and operational. The flow measurement (daily profile) of the biogas was carried out through a vertical drain located in one of the cells of the Sanitary Landfill. The biofuel flow measurement was carried out using an LPG Building gas meter. The biogas purification tests were carried out using a gas scrubber followed by an absorption column, using solutions of calcium hydroxide Ca(OH)₂ at 0.12 mol/L, 0.17 mol/L and 0.22 mol/L and a variation of solution between 300 and 600 L/h for CO₂ removal. To achieve the objective of this research, the following methodological steps were developed: (a) flow measurement, (b) collection and analysis of the biogas sample, (c) experimental tests. A daily biogas flow of 4m³ was measured. Satisfactory results have methane concentration values ranging from 70 to 89%. The highest value of methane concentration (86%) was found using 600 L/h of solvent flow and 0.17 and 0.22 mol/L for the variation of the concentration of the absorber. With these same parameters, the highest calorific value of 7700 Kcal/m³ was achieved. Therefore, it was noticed that to obtain higher values of methane concentration and its calorific value, it depends mostly on the solution flow rate, while the concentration of the absorber solution exerts a minimal influence on the results.

Keywords: Methane. Landfill. CO₂ removal. Biogas purification. Gas scrubber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do fluxo concorrente líquido-gás.....	20
Figura 2 - Representação do fluxo contracorrente líquido-gás.	20
Figura 3 - Diagrama dos procedimentos metodológicos abordados neste trabalho.	22
Figura 4 - Localização do Aterro Sanitário de Palmas - TO.	23
Figura 5 - Tanques de tratamento do Aterro Sanitário de Palmas - TO.	24
Figura 6 - Aterro Sanitário localizado em Palmas - TO.	24
Figura 7 - Adaptação do sistema para captação de gases no Aterro Sanitário de Palmas - Tocantins	25
Figura 8 - Medidor de vazão de biogás no Aterro Sanitário de Palmas - Tocantins.....	26
Figura 9 - Kit desenvolvido pela Alfakit em parceria com a EMBRAPA.	26
Figura 10 – Protótipo proposto para purificação do biogás.	28
Figura 11 - Representação do planejamento experimental utilizado no processo de purificação do biogás proveniente do Aterro Sanitário de Palmas - TO.	29
Figura 12 - Valores Experimentais x Valores Preditos para a concentração do metano.....	34
Figura 13 - Representação do Diagrama de Pareto.	34
Figura 14 - Superfície de resposta.	36
Figura 15 - Valores Analisados x Valores Preditos do poder calorífico do biogás.....	38
Figura 16 - Gráfico de Pareto do poder calorífico do biogás.	39
Figura 17 - Gráfico de superfície que representa a capacidade máxima do poder calorífico do biogás.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos principais componentes do biogás de aterro	16
Tabela 2 - Níveis dos fatores empregados no Planejamento Experimental, durante o tratamento de biogás.	29
Tabela 3 - Ordem dos experimentos empregados no Delineamento de Faces Centradas (DFC).	29
Tabela 4 - Dados obtidos nos testes iniciais de purificação de biogás do Aterro Sanitário de Palmas - TO.	30
Tabela 5 - Análise estatística obtida com o Teste-t considerando variância equivalente nos testes de purificação de biogás.	31
Tabela 6 - Resultado do teste de absorção sob efeito das duas variáveis (vazão do solvente e concentração do absorvente).	32
Tabela 7 - Coeficientes de regressão do Planejamento DFC.	33
Tabela 8 - ANOVA para purificação de biogás de Aterro Sanitário visando elevação da concentração de metano na saída do sistema.	33
Tabela 9 - Coeficientes de regressão do Planejamento DFC para definição do poder calorífico de biogás.	37
Tabela 10 - ANOVA para purificação de biogás de Aterro Sanitário visando elevação do poder calorífico do biogás.	37

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS, ACÔNOMOS E SIMBOLOS

GEE	Gases de efeito estufa
BLFGE	Projeto Bandeirantes de Gás para Energia
BEN	Balanco Energético Nacional
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
LARSEN	Laboratório de inovação em aproveitamento de resíduos de sustentabilidade energética do Tocantins
IFTO	Instituto Federal do Tocantins
DFC	Delineamento de Faces Centradas
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
NH ₃	Amoníaco
SiO ₂	Dióxido de Silício
K ₂ CO ₃	Carbonato de Potássio
Min	Minuto
H	Hora
Kcal	Quilocaloria
L	Litro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Problemas de pesquisa	13
1.2. Justificativa	13
1.3. Objetivos	14
1.3.1. Objetivo Geral	14
1.3.2. Objetivos Específicos	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1. Geração de gases em Aterro Sanitário	15
2.2. Aproveitamento energético do biogás	16
2.3. Tratamento ou purificação do gás de aterro	17
2.4. Tecnologias de remoção de CO₂	18
2.5. Propriedades da absorção	19
2.5.1. Soluções utilizadas como solvente em processo de absorção de CO ₂	20
2.5.2. Hidróxido de Cálcio	21
2.5.3. Equipamentos utilizados para absorção	22
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	22
3.1. Local da pesquisa	23
3.2. Medição de fluxo e coleta de biogás	25
3.3. Coleta e análise de biogás	26
3.4. Teste de purificação do biogás	27
3.5. Testes iniciais	28
3.6. Planejamento Experimental	28
3.6.1. Delineamento de Faces Centradas (DFC)	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1. Medição da vazão	30
4.2. Testes iniciais	30
4.3. Planejamento experimental	32
4.3.1. Concentração do Metano	32
4.3.2. Poder calorífico do biogás	36
5. CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação das sociedades modernas com o impacto ambiental ao nível da produção de gases com efeito estufa (GEE) causados pelo uso intensivo de combustíveis fósseis, aliada a conjuntura de permanente instabilidade dos preços do petróleo cujas reservas caminham rapidamente para o seu esgotamento, forçou os governos dos países desenvolvidos a buscar políticas de promoção das energias renováveis (TEIXEIRA, 2010).

Vários problemas ambientais estão relacionados com a prática do aterro sanitário. Porém, o principal problema é a emissão descontrolada de biogás produzido pela digestão anaeróbia do material orgânico contido nos resíduos sólidos, tendo consequências locais e globais para o desequilíbrio energético natural da Terra (ALVES, COLARES, UTURBEY, 2008).

A composição média do biogás gerado em Aterros Sanitários corresponde a cerca de 60% de metano (CH_4), 35% de dióxido de carbono (CO_2) e os outros 5%, correspondem aos gases responsáveis pelo efeito estufa, como compostos nitrogenados, sulfatados, vapor de água e monóxido de carbono (MARQUES, 2019). O gás metano (CH_4) é um dos compostos presentes no biogás que possui um maior efeito deletério ao meio ambiente, possuindo um potencial de aquecimento global 21 vezes maior que o gás carbônico (PECORA, 2009).

O dióxido de carbono tem um efeito de diluição no biogás, reduzindo o seu conteúdo energético. Sua remoção é de particular interesse para algumas aplicações do biogás como, por exemplo, a utilização como biocombustível em veículos, injeção na rede de gás natural, entre outras (MAGALHÃES, et al., 2004).

Para que o metano do biogás de aterro possa ser utilizado como combustível é necessário tratamento prévio visando a remoção de CO_2 , visto que este afeta a capacidade calorífica do metano além de, na presença de umidade, contribuir diretamente para o desenvolvimento de corrosão das tubulações dos sistemas de transporte e armazenamento (SOUZA-FILHO et. al, 2018).

Desta forma, este presente trabalho terá como diretriz apresentar a viabilidade de alternativas de purificação de biogás proveniente do Aterro Sanitário de Palmas (TO), através da absorção e reação química com a remoção do gás CO_2 em solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, empregando para isto, um sistema de lavador de gases de baixo custo construtivo e operacional.

1.1. Problemas de pesquisa

O trabalho busca apresentar informações suficientes para responder a seguinte problemática: O sistema de purificação proposto na presente pesquisa (lavador de gás com absorção e reação química), pode ser empregado na remoção de CO₂ de biogás gerado no Aterro Sanitário do município de Palmas – Tocantins?

1.2. Justificativa

A disposição final do lixo urbano é um dos graves problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos em todo o mundo e tende a agravar-se com o aumento do consumo de bens descartáveis, que passam cada vez mais a compor os grandes volumes de lixo gerados pela população (PECORA; VELAZQUEZ; COELHO, 2008).

Essa ameaça ambiental se faz presente na emissão descontrolada do gás metano presente no biogás produzido pela decomposição anaeróbica da matéria orgânica dos resíduos sólidos. Os principais componentes desse biogás são o dióxido de carbono e o gás metano, agentes responsáveis pelo fenômeno do efeito estufa (ALVES; COLARES; UTURBEY, 2008).

De acordo com dados fornecidos pelo projeto BLFGE (2004) a destinação final dos resíduos sólidos no Brasil possui a seguinte distribuição: 63,1% são depositados em lixões a céu aberto, 18,3% em aterros controlados, 13,1% em aterros sanitários e 4,9% outra destinação não informada. Somente no Estado do Tocantins, são gerados 23.898,20 toneladas por mês de resíduos sólidos urbanos, sendo que 38% dos resíduos são matéria orgânica (PERS/TO, 2016).

Apesar da disposição inadequada dos resíduos sólidos, o país vem buscando desenvolver e incentivar novas iniciativas de baixo carbono. Dessa forma, a energia renovável oferece um conjunto de opções para atender a crescente demanda de energia, como a solar, eólica, hidráulica, gás natural, além de etanol e biodiesel, especialmente quando se trata de desenvolvimento econômico levando em consideração as questões sociais e ambientais (BONDARIK; PILATTI; HORST, 2018).

De acordo com dados levantados pelo Balanço Energético Nacional (BEN) relatório fornecido anualmente pelo Ministério de Minas e Energia, o Brasil dispõe em 2021 de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica que responde por 53,4% da oferta interna. As fontes renováveis representam 78,1% da oferta interna de eletricidade no Brasil (BEN, 2022).

O aproveitamento ambiental do biogás produzido por Aterros Sanitários, além de contribuir para a diversificação da matriz energética brasileira, também reduz significativamente a dispersão de poluentes atmosféricos gerados pelos Aterros Sanitários, contribuindo para o franco desenvolvimento de um modelo energético sustentável, e possibilitando que um combustível antes descartado, sem nenhum aproveitamento energético, seja aproveitado para a geração de potencial elétrico (MACIEL, 2009).

Assim, diante as crescentes discussões sobre produção de energia limpa como forma de combater o aumento dos gases do efeito estufa, torna-se necessário estudar formas de aproveitamento energético do biogás gerado em aterro sanitário, evitando assim que as suas emissões em grandes quantidades passem para a atmosfera.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Promover a remoção de CO_2 , além do incremento da concentração do CH_4 no biogás oriundo do aterramento de resíduos sólidos urbano da cidade de Palmas-Tocantins, utilizando lavador de gases de baixo custo com adição de aditivos na água de lavagem, submetidos a variações construtivas e operacionais.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a composição do biogás bruto do aterro e, em seguida, sua composição após passar por processo de tratamento;
- Propor e implantar um protótipo de lavador de gases de baixo custo de fabricação e operação;
- Avaliar a influência da adição de solução Ca(OH)_2 na absorção com reação química de CO_2 no sistema de lavagem de biogás.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Geração de gases em Aterro Sanitário

O biogás gerado em Aterros Sanitários é proveniente da degradação biológica da matéria orgânica e ocorre através de dois processos: a decomposição aeróbia, que acontece naturalmente pela ação dos microrganismos durante o período de acumulação dos resíduos; e posteriormente, a decomposição anaeróbica, proveniente da redução do CO₂ nos resíduos (PIÑAS; et al, 2016). Quanto maior a quantidade de materiais biodegradáveis, maior será a taxa de geração de gases (BORBA, 2006).

A geração de biogás em Aterros Sanitários, pode ser descrita em cinco fases, sendo a primeira o ajuste inicial de todo o processo; a segunda, consistindo em uma fase de transição; a terceira, compreendendo uma fase ácida de reação; a quarta, a fase metanogênica, onde ocorre a formação do metano; e por fim, a quinta e última fase, compreendendo a fase de maturação ou estabilização da matéria orgânica confinada no interior do maciço de resíduos (POHLAND e HARPER, 1985).

A duração de cada fase da produção do biogás vai depender de uma série de fatores que influenciam o processo biológico das mesmas, como a distribuição dos componentes no aterro, disponibilidade de nutrientes, umidade dos resíduos e grau de compactação inicial (TEIXEIRA, 2010).

Segundo Teixeira (2010), a velocidade de decomposição, medida através da produção de gás, chega a um máximo nos primeiros dois anos e logo decresce lentamente por 25 anos ou mais. Entretanto, não é possível definir claramente as fases de um aterro, já que novos resíduos são dispostos diariamente.

Para Maciel (2009) é importante ressaltar que dentro de um aterro sanitário, vários fatores irão influenciar na geração do biogás ao longo do tempo. Entre eles, os mais significativos são: umidade, tamanho das partículas, temperatura, pH, idade do lixo, projeto do aterro e sua operação (BORBA, 2006).

A composição do gás de aterro varia em função da fase de decomposição dos resíduos sólidos, do tratamento e do tipo de resíduos, além de apresentar alguns constituintes em grandes quantidades como o CH₄ e CO₂, e outros em pequenas quantidades, como H₂, N₂, O₂, H₂S e NH₃ (MACIEL, 2009). A Tabela 1 apresenta algumas características dos principais gases encontrados no biogás.

Tabela 1 - Propriedades dos principais componentes do biogás de aterro

Composição do biogás	Símbolo Químico	Composição típica	Pod. Calorífico (kJ/m ³)
Metano	CH ₄	45-60%	35.600
Dióxido de carbono	CO ₂	35-50%	----
Nitrogênio	N ₂	0-10%	----
Oxigênio	O ₂	0-4%	----
Monóxido de Carbono	CO	<0,1%	12.640
Hidrogênio	H ₂	<0,1%	10.760
Gás Sulfídrico	H ₂ S	<0,07%	N.I

Fonte: Maciel (2003).

2.2. Aproveitamento energético do biogás

Um dos importantes fatores pelos quais se faz a recuperação do biogás, tem a ver com o fato dos seus principais componentes (o metano e o dióxido de carbono) contribuírem para o efeito estufa da atmosfera, e não somente focando no seu poder energético (TEIXEIRA, 2010). Além disso, o composto CH₄ é 21 vezes mais agressivo que o CO₂ por ser mais ativo na retenção de calor na camada da estratosfera (KLAUS, 2014).

O poder de geração de energia do biogás é determinado então pelo teor de metano na sua composição. A quantidade de energia que o gás dispõe é analisada através de dois parâmetros termodinâmicos, que são eles: o valor calorífico superior ou poder calorífico inferior (SOUZA-FILHO, 2016).

Porém, para além do poder calorífico, é avaliado também a presença de contaminantes e substâncias não combustíveis na composição do biogás, como por exemplo, a água e o dióxido de carbono, que são substâncias que absorvem parte da energia gerada, diminuindo assim o poder calorífico e energético do biogás (FIGUEIREDO, 2011).

Quando a concepção de aterros sanitários visa, além do armazenamento correto do lixo, o aproveitamento do biogás gerado ao longo do tempo, possibilita maior eficiência na produção e captação do metano gerado na degradação da matéria orgânica presente nos resíduos. Esse biogás captado pode ser queimado em *flare*, onde ocorre a transformação do metano em dióxido de carbono, ou então ser convertido em energia elétrica, ou utilizado em iluminação a gás. Há ainda a possibilidade de a energia ser consumida pelo próprio aterro ou,

em caso de produção excedente, ser comercializada, proporcionando assim uma receita adicional ao aterro (PECORA; VELAZQUEZ; COELHO; 2008).

Independente da utilização energética do biogás, é recomendado que seja instalado um *flare* enclausurado para, caso haja falha no sistema de geração de energia, pode ser evitado a emissão de metano para atmosfera (MONTAGNA, 2013).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2018), o objetivo do aproveitamento energético do biogás gerado pela decomposição dos resíduos sólidos em aterro é convertê-lo em uma forma de energia útil, como por exemplo, eletricidade, vapor, combustível veicular, para caldeirões ou fogões, ou abastecer gasodutos com gás de qualidade. Para isso, deve-se projetar sistemas de coleta, tratamento e queima controlada do biogás, sempre garantindo a maior eficiência de queima do metano e sua produção energética.

2.3. Tratamento ou purificação do gás de aterro

Em síntese, a purificação do biogás se dá pela remoção das substâncias que não são aproveitadas para a combustão, como o dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3) e vapor de água (H_2O), resultando em um gás livre de componentes indesejados e com uma concentração de metano (CH_4) superior a 95% de pureza, ideal para o fornecimento desse gás (MARQUES, 2019).

A presença de vapor de água na composição do biogás prejudica as instalações podendo agir como agente corrosivo após sua condensação, enquanto o dióxido de carbono ocupa elevado volume o que resulta na necessidade de maior capacidade de armazenamento. Além disso, o gás sulfídrico, mesmo que em pequenas concentrações, é altamente corrosivo e danoso as tubulações e partes metálicas, diminuindo a vida útil dos equipamentos utilizados (FIGUEIREDO, 2011). Desta forma, há fatores que devem ser avaliados com o objetivo de garantir um sistema de purificação e geração de energia eficiente e operando de forma adequada.

Existem diferentes alternativas de purificação de biogás, o método mais adequado vai depender da aplicação energética a qual se pretende (ALVES, 2000). Segundo Maciel (2009), o tratamento com remoção de CO_2 deve ser empregado quando se deseja aproveitar o gás em gasodutos ou como combustível veicular.

O sistema de tratamento ou purificação do biogás, pode ocorrer em diferentes etapas, dentre elas estão:

- **Remoção da umidade:** Essa etapa pode ser realizada de duas formas, a remoção física de água livre (condensação), ou remoção química através da absorção ou adsorção (RYCKEBOSCH, 2011). Outras formas de remoção da umidade incluem a adoção de compostos de glicóis, gel e sílica.
- **Retirada do gás sulfídrico (H_2S):** A remoção do gás sulfídrico é estritamente biológica, tendo um custo menor em relação aos purificadores químicos tradicionais. Vale salientar que antes de decidir uma técnica para retirada do H_2S , deve-se considerar uma técnica de remoção de CO_2 primeiro (RYCKEBOSCH, 2011).
- **Retirada dos Siloxanos:** A técnica de remoção de siloxanos mais utilizada atualmente é a adsorção, processo que consiste na passagem do biogás por colunas compostas por filtros de carvão ativo, livrando a mistura gasosa desses compostos altamente danosos ao motogeradores, visto que após a queima completa do biogás, os siloxanos são convertidos em dióxido de silício (SiO_2), principal constituinte da areia, o que faz com que o material fique depositado no interior dos motores (MARQUES, 2019).
- **Remoção do dióxido de carbono (CO_2):** A remoção pode ser realizada através do processo de lavagem com água, solventes como carboneto de potássio (K_2CO_3) em temperaturas elevadas e processos de absorção química e física ou adsorção (RYCKEBOCH, 2011).

Os lavadores de gases são comumente utilizados na purificação do biogás e seguem a seguinte disposição: um gás poluído entra no coletor, atravessa a garganta do lavador onde é injetado um líquido, geralmente água, que será disperso num fino spray com gotas de variadas granulometrias. Devido à força exercida pelo gás, as partículas sólidas carregadas por ele são capturadas pelas gotículas do líquido e em seguida estas são separadas do gás limpo na abertura da garganta (TELES; SALVADOR; NASCIMENTO, 2003).

2.4. Tecnologias de remoção de CO_2

A redução da emissão deste gás para o meio ambiente é um desafio e ao mesmo tempo uma oportunidade de desenvolvimento tecnológico. Atualmente, a remoção de CO_2 tem sido realizada por absorção gasosa, no qual consiste em uma operação unitária em que um ou mais de um componente de uma mistura gasosa é transferido para a fase líquida (CARVALHO; et al, 2007).

Porém, existem diversos métodos para reduzir o dióxido de carbono, os mais comuns são: lavadores de gases (*Water Scrubbing*) com água ou solventes orgânicos, adsorção

com modulação de pressão (*Pressure Swing Adsorption – PSA*) podendo ser utilizado carvão ativado ou peneira molecular, remoção por membrana e criogenia (FREDDO, 2017).

2.5. Propriedades da absorção

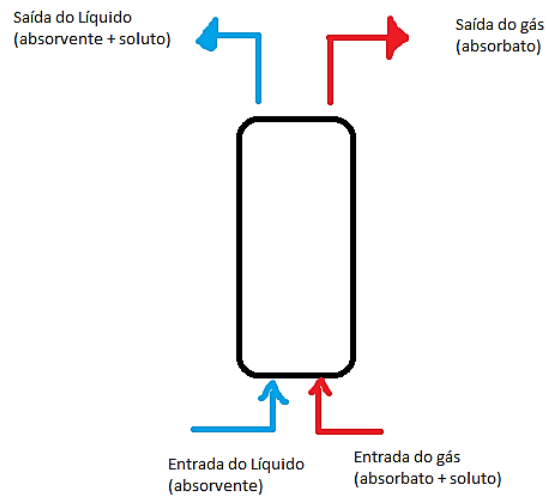
O processo de absorção pode ser subdividido em absorção química ou absorção física. A primeira ocorre quando o soluto não interage com o solvente, podendo assim ser reutilizado retornando ao processo. Na absorção química, a substância interage quimicamente com o solvente, é mais utilizado quando se deseja obter a remoção completa de um soluto a partir de uma mistura gasosa (TREYBAL, 1980).

Os absorventes químicos podem ser usados em conjunto com outras tecnologias de purificação para potencializar a eficiência do processo. O solvente mais comum utilizado é a água, empregada em lavadores de gás. Além disso, a adição de produtos químicos pode melhorar o processo de absorção, resultando em menor consumo de água e de energia. No entanto, a desvantagem com o processo de absorção é a necessidade de regenerar o solvente usado para aplicação no próximo lote, ou até mesmo substituição quando não é possível realizar a regeneração (RYCKEBOSCH, 2011).

De acordo com Leite (2005), a absorção pode ser um processo essencialmente físico ou seguido por reações químicas, a depender do grau de solubilidade do soluto no solvente. Assim como o CO₂, outros gases tem seu grau de solubilidade em água aumentada, em função de intensas interações intermoleculares que originam em reações químicas (SILVA; et al, 2017). Muitas são as variáveis que definem o seu estado, como temperatura, pressão e razão líquido/gás. O último fator define a quantidade de solvente necessário para absorver uma determinada quantidade de soluto (MAGALHÃES; et al, 2004).

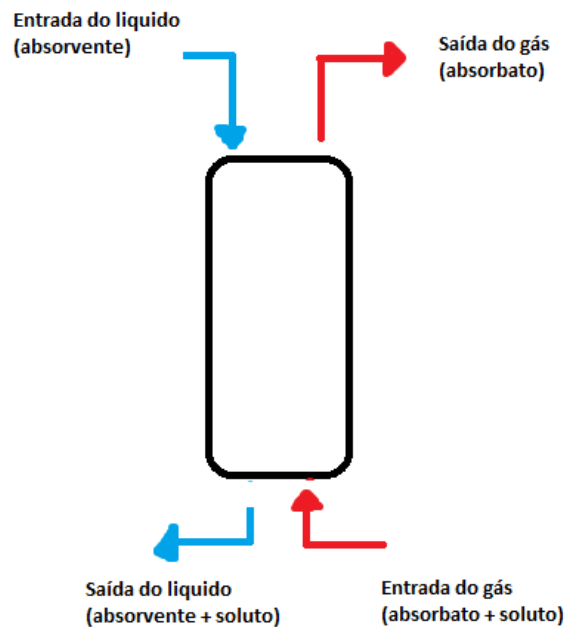
O processo de absorção também pode ser definido de acordo com o sentido do escoamento do gás e do líquido. Como demonstrado na Figura 1, o fluxo pode ser concorrente, ou seja, o gás e o líquido escoam na mesma direção e sentido. A Figura 2 apresenta um fluxo em contracorrente, em que o gás e líquido escoam na mesma direção, porém em sentidos opostos (MELLO, 2013).

Figura 1 - Representação do fluxo concorrente líquido-gás



Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 2 - Representação do fluxo contracorrente líquido-gás.



Fonte: Autoria própria, 2022.

2.5.1. Soluções utilizadas como solvente em processo de absorção de CO₂

Para Treybal (1980), deve-se considerar a importância de algumas propriedades antes de realizar a escolha do solvente para absorção. Entre elas estão:

- **Solubilidade do gás:** o grau de solubilidade do gás deve ser alto, a fim de aumentar a rapidez da absorção e diminuir a quantidade requerida do solvente. Em síntese, os solventes de origem química similar ao do soluto, apresentam nível de solubilidade adequada.
- **Volatilidade:** o solvente deve ter uma pressão de vapor baixa, visto que durante o processo de absorção o gás está saturado com o solvente, e por consequência da evaporação, pode vir a perder grande quantidade.
- **Corrosão:** os materiais e equipamentos não podem ser de natureza corrosiva. Além de não serem compostos tóxicos e inflamáveis.
- **Custo:** o solvente deve ser barato e de fácil obtenção, para que, caso haja uma perda da substância durante o processo, o sistema não tome prejuízo.
- **Viscosidade:** é preferível que o solvente apresente baixa viscosidade para melhor rapidez da absorção, melhores características durante o escoamento nas torres de absorção, baixas quedas de pressão e satisfatória transferência de calor.

Infelizmente, na prática é raro encontrar um solvente que atenda tais critérios, sem exceção. Assim, a escolha se faz com base na alternativa mais viável, como por exemplo, o custo. Isso ocorre também, porque normalmente o gás de saída está saturado de solvente, fazendo com que o fator custo do solvente seja analisado preferencialmente, devido as perdas existentes (MAGALHÃES; et al, 2004).

2.5.2. Hidróxido de Cálcio

Hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), ou cal hidratada como é comumente chamado, consiste em uma solução diluída de cal apagada que é largamente utilizada para detecção de presença de dióxido de carbono. Por conta disso, se apresenta como uma solução eficiente para absorção de gás carbônico (HAN; et al, 2011).

Embora muitos trabalhos já terem analisado e evidenciado o desempenho de soluções aquosas de Ca(OH)_2 como absorvente em sistemas de captura de CO_2 , ainda há escassez dessa substância em diferentes condições operacionais, como vazão de gás de saída, concentração e pressão de gás carbônico (HAN; et al, 2011).

Apesar do sistema de captura de CO_2 empregando processo de absorção com solução Ca(OH)_2 ser tecnicamente simples, não oferecer riscos ao meio ambiente e possuir o custo de operação baixo, destaca-se a necessidade de remover todos os sedimentos e partículas

em suspensão para evitar entupimentos nos equipamentos e materiais que compõem o sistema de remoção do gás (MARTINS, RUGNO, 2021).

2.5.3. Equipamentos utilizados para absorção

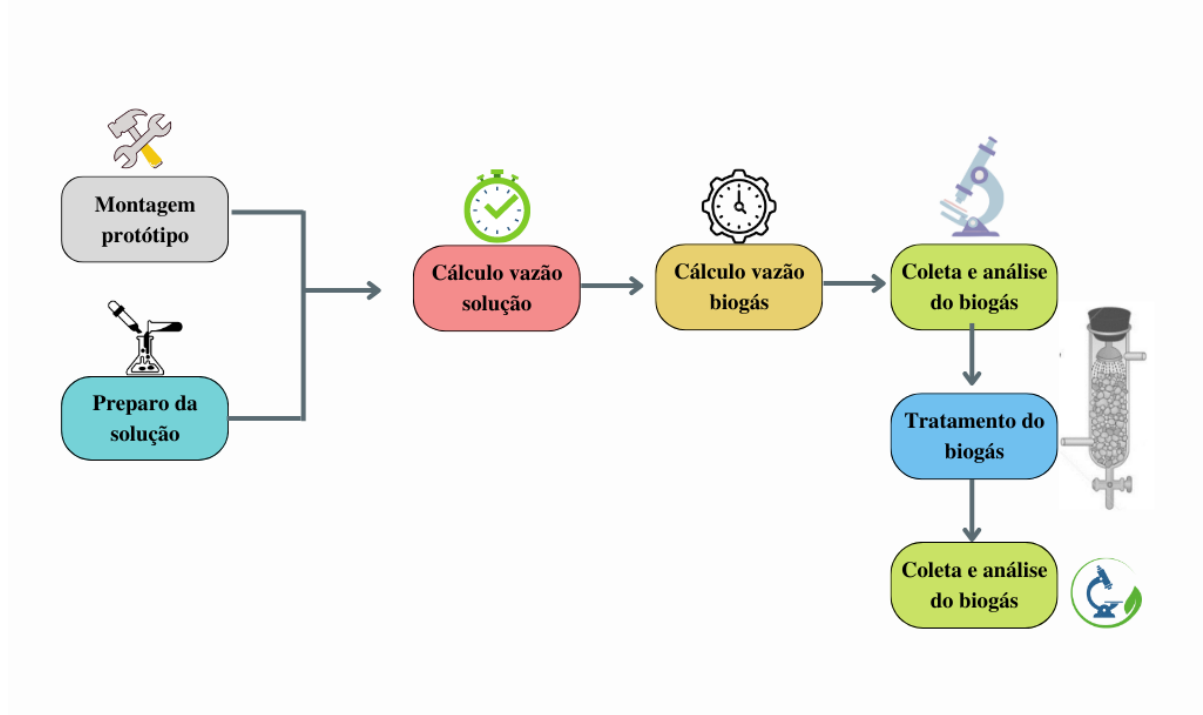
Segundo Magalhães, et al (2004), as colunas recheadas são bastante aplicadas nos processos de separação de gases por absorção e contam com um sistema simples de construção e operação. Constituem de uma coluna cilíndrica, uma placa perfurada para suporte do recheio e distribuição do solvente.

O funcionamento da coluna geralmente é contracorrente, ou seja, o soluto entra na parte inferior da coluna, enquanto o solvente entra na parte superior, estabelecendo então um fluxo líquido-gás em direção contracorrente. O principal componente da coluna é o recheio, cuja função refere-se a promover uma maior superfície de contato entre o líquido e o gás, aumentando a taxa de absorção do sistema e garantindo a eficácia do processo. Apesar de existir diversos tipos de recheios, normalmente são utilizados materiais como cerâmica, carbono, aço e polietileno (MAGALHÃES, et al, 2004).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia utilizada nesta pesquisa é baseada no diagrama esquemático da Figura 3.

Figura 3 - Diagrama dos procedimentos metodológicos abordados neste trabalho.



3.1. Local da pesquisa

O Aterro Sanitário de Palmas está localizado a 26 km do centro do centro da cidade, na área rural, ao sul do município (Figura 4). A área do aterro é de 95,77 ha, a qual é cercada com tela de alambrado em aço galvanizado e malha 15x15 com altura de 1,5m. Em seu perímetro de 4 km há uma plantação de eucalipto da espécie citriodora. Na entrada existe uma guarita, de controle de coleta dos dados, como tipo de resíduos, placa, horário e saída de veículos e pessoas, e uma balança de 30 toneladas para conhecer a quantidade dos resíduos gerados. No processo de tratamento dos resíduos, são empregados os seguintes equipamentos: pá mecânica, retroescavadeira, caminhão basculante e trator de esteira para a dispersão e compactação dos resíduos.

Figura 4 - Localização do Aterro Sanitário de Palmas - TO.



Fonte: Google (2019), organizado pelo autor (2022).

Composto por 6 células com dimensões 150x200m e 2,5m de profundidade, sendo 5 células encerradas e uma em operação, são impermeabilizadas com manta geomembrana PEAD (Polietileno de Alta Densidade) de 2mm. O sistema de drenagem do chorume gerado é constituído por drenos de PVC com diâmetro de 160mm e 40cm de altura, interligados aos de drenagem de gases que direcionam o chorume para o tratamento. A figura 5 demonstra uma parte do sistema de tratamento do chorume, que é composto por 05 lagoas (1 lagoa anaeróbia, 1 facultativa, 1 de maturação, 1 de polimento e 1 de infiltração).

Figura 5 - Tanques de tratamento do Aterro Sanitário de Palmas - TO.



Fonte: palmas.to.gov.br

Os gases são drenados por tubos verticais, perfurados de concreto de 1,20m de diâmetro protegidos com brita nº 4 e tela de 2 m de diâmetro, e por fim são queimados em drenos abertos. Para a realização desta pesquisa foi utilizado apenas uma célula, já encerrada, para coleta de amostras. A Figura 6 demonstra melhor a disposição e concepção do Aterro Sanitário do município de Palmas – TO.

Figura 6 - Aterro Sanitário localizado em Palmas - TO.



Fonte: palmas.to.gov.br

3.2. Medição de fluxo e coleta de biogás

Para realização das medições do biogás foi utilizado 01 dreno vertical, onde realizou-se medições de perfil diário. O dreno vertical já possui o fechamento com tampa de concreto com um orifício central, para saída do biogás, adaptado através de uma conexão de aço e tubulação de interligação à válvula de saída do biogás, onde se conecta através de tubulação de cobre ao medidor de vazão (Figura 7).

Figura 7 - Adaptação do sistema para captação de gases no Aterro Sanitário de Palmas - Tocantins



Fonte: Pedroza, 2022.

A medição de vazão do biogás foi realizada através de um medidor de gás GLP, da Marca LAO G-0,6 Predial, interligado através de conexão de cobre maleável de 3/8", com vazão mínima de 0,016 m³/h e vazão máxima de 1,0 m³/h, com sistema totalizador com modelo ciclométrico de 8 dígitos com proteção com tampa de policarbonato transparente (Figura 8).

Figura 8 - Medidor de vazão de biogás no Aterro Sanitário de Palmas - Tocantins



Fonte: Autor, 2022.

3.3. Coleta e análise de biogás

A coleta do biogás foi realizada com o auxílio de saco plástico tipo BAG, seringa plástica coletora de 100 mL e reagentes. A análise dos gases aconteceu antes e depois do tratamento, com o auxílio de um kit (Figura 9) que contém instrumentos para a leitura da concentração do gás CO_2 e CH_4 , nos permitindo executar uma análise de forma rápida e simples. Para isso, o biogás é borbulhado em uma solução onde a concentração é dada pela diferença entre o volume do gás inicial e final.

Figura 9 - Kit desenvolvido pela Alfakit em parceria com a EMBRAPA.



Fonte: <https://alfakit.com.br>

3.4. Teste de purificação do biogás

O sistema de purificação é constituído por um lavador de gases seguido por uma coluna recheada com sílica gel para retirada de umidade. No lavador foi empregada solução de hidróxido de cálcio com concentrações de 0,12, 0,17 e 0,22 mol/L, para redução do teor de gás carbônico. A montagem do sistema de purificação do biogás foi realizada nas dependências do Laboratório LARSEN (IFTO - Campus Palmas).

O teste foi realizado em sistema de lavagem de gás contendo um fluxo de solução contracorrente aos gases. A Figura 10 mostra o protótipo proposto para a realização da purificação do biogás. O material escolhido para sua construção é o PVC, pois possui o fator custo, sendo mais acessível para elaboração e execução do experimento. O fechamento das extremidades é feito através de um tampão de PVC, com orifício central inferior, para a saída da solução absorvente, e superior, para a saída do gás tratado. Nas laterais possuem dois orifícios, sendo um a 20 centímetros da base para a entrada do biogás, e outro a 25 centímetros da base para entrada da solução absorvente.

O funcionamento do purificador ocorre da seguinte forma: o gás entra por baixo e a solução absorvente, em contra fluxo, por cima. O biogás sofrerá resistência ao passar sob uma coluna da solução absorvente, em contra fluxo. O objetivo é fazer com que haja maior área de contato possível entre líquido e o biogás para absorver maior concentração de CO₂.

A tubulação de saída do biogás tratado foi instalada no topo do filtro, que após contato com a solução absorvente, é realizada a leitura dos teores dos gases. Na parte inferior do filtro, foi instalada a saída da solução solvente, a qual retorna ao sistema através de uma bomba hidráulica. Todas as entradas e saídas de biogás foram vedadas utilizando adaptadores para caixas d'água devido seu bom desempenho e baixo custo.

Figura 10 – Protótipo proposto para purificação do biogás.



Fonte: Autor, 2022.

3.5. Testes iniciais

Durante os testes foi avaliado os ajustes das seguintes variáveis de processo: vazão do biogás, a vazão da solução, concentração da solução e o tempo de contato. Foram realizados testes com lavador de gás com modificação da concentração da solução de 0,12 mol/L, 0,17 mol/L e 0,22 mol/L, seguindo recomendações de Srichat et al. (2017) e Pertiwinigrum et al. (2019), mantendo constante a vazão de solução de 450 L/h.

3.6. Planejamento Experimental

Nesta etapa da pesquisa foi realizado um planejamento experimental no intuito de verificar os efeitos de duas variáveis (vazão do solvente e concentração da solução absorvente) no processo de purificação de biogás, proveniente do Aterro Sanitário de Palmas/TO. Os dados obtidos nesse planejamento foram calculados seguindo orientações do software *Protimiza Experimental Design*, que é uma ferramenta estatística de planejamento de experimentos e otimização de processos.

3.6.1. Delineamento de Faces Centradas (DFC)

Através de planejamento multivariável foi verificado o efeito de dois fatores no sistema de purificação de biogás em estudo (Figura 11). Foi aplicado o planejamento Delineamento de

Faces Centradas (DFC), sem repetições, e com 11 tipos de combinações entre os fatores. Os valores mínimos e máximos são apresentados na Tabela 2.

Figura 11 - Representação do planejamento experimental utilizado no processo de purificação do biogás proveniente do Aterro Sanitário de Palmas - TO.



Fonte: Autor, 2022.

Onde:

- Fator 1 – vazão da solução absorvente (L/h)
- Fator 2 – concentração da solução absorvente (mol/L)

Tabela 2 - Níveis dos fatores empregados no Planejamento Experimental, durante o tratamento de biogás.

Fatores	Níveis		
	(-1)	0	(+1)
Vazão da solução absorvente (L/h)	300	450	600
Concentração da solução absorvente (mol/L)	0,12	0,17	0,22

Fonte: Autor, 2022.

Os experimentos foram realizados de forma aleatória, com três repetições, como demonstrado na Tabela 3, assim como a ordem dos experimentos.

Tabela 3 - Ordem dos experimentos empregados no Delineamento de Faces Centradas (DFC).

Ordem dos Experimentos	Fatores	
	Vazão da solução absorvente(L/h)	Concentração da solução absorvente (mol/L)
1	-1	-1
2	1	-1

3	-1	1
4	1	1
5	-1	0
6	1	0
7	0	-1
8	0	1
9	0	0
10	0	0
11	0	0

Fonte: Autor, 2022.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Medição da vazão

Através da medição de perfil diário com a utilização do medido de gás GLP foi possível obter o resultado do acumulado da vazão de biogás do Aterro Sanitário de Palmas – TO. Entre as 07:00 da manhã do dia 23 as 07:00 da manhã do dia 24 de julho de 2021 o volume diário de biogás acumulado foi de 4,025 m³, podendo também ser lido como 0,17 m³/h.

4.2. Testes iniciais

Pode ser verificado na Tabela 4 os dados obtidos nos testes iniciais da purificação de biogás do Aterro Sanitário de Palmas – TO. Foi aplicado o Teste-t para simular variâncias equivalentes no tratamento estudado, com o objetivo de averiguar a existência ou não de diferença entre eles (Tabela 5). O biogás bruto do Aterro Sanitário de Palmas – TO, antes da etapa de purificação, apresentou em sua constituição um teor de metano igual a 50%. Valores próximos a esse teor de metano em amostra proveniente de aterros sanitários já foi reportado por outros pesquisadores (ANTONIO, 2012)

Tabela 4 - Dados obtidos nos testes iniciais de purificação de biogás do Aterro Sanitário de Palmas - TO.

Experimentos	Concentração de solução absorvente (mol/L)	
	0,8	0,16
1	68	65
2	70	75
3	65	85

Média	67,7	75
Desvio Padrão	2,51	10
Graus de Liberdade	2	2

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 5 - Análise estatística obtida com o Teste-t considerando variância equivalente nos testes de purificação de biogás.

	0,08 mol/L	0,16 mol/L
Média	67,7	75
Variância	6,33	100
Observações	3	3
Variância agrupada	53,16	
Hipótese da diferença de média	0	
GI	4	
Stat t	-1,2318	
P(T<=t) uni-caudal	0,1427	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,2855	
t crítico bi-caudal	2,7764	

Fonte: Autor, 2022.

De acordo com os dados obtidos nos ensaios e nas análises, como pode ser observado nas Tabelas 4 e 5, não existem diferenças significativas de médias nos dois tratamentos empregados, no nível de confiança de 95%. Visto isso, partindo como referência a remoção de gás carbônico (CO₂) do biogás, o recomendado seria executar a operação do lavador de gases com uma concentração de solução absorvente igual a 0,08 mol/L, promovendo assim uma maior economia por conter uma quantidade menor de hidróxido de cálcio.

Foi obtido um valor de 75% para o enriquecimento do CH₄ desta presente pesquisa, sendo inferior ao resultado de 89,3% encontrado por Srichat, *et al*, (2017). Tal diferença pode ser associada com a vazão da solução absorvente empregada no processo, de 7,5 L/min desta pesquisa e 30 L/min pela pesquisa realizada por Srichat, *et al*, (2017).

4.3. Panejamento experimental

O método adotado foi o Delineamento de Faces Centradas (DFC), anteriormente definido no planejamento experimental e descrito nos procedimentos metodológicos. Foi considerado analisar a influência de dois fatores no tratamento do biogás, sendo eles: a vazão do solvente (X_1) e a concentração do absorvente (X_2). Os resultados e ordem dos experimentos estão expressos na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultado do teste de absorção sob efeito das duas variáveis (vazão do solvente e concentração do absorvente).

Experimentos	Vazão do solvente (L/h)	Concentração do absorvente (mol/L)	Concentração do metano (%)	Poder calorífico do biogás (Kcal/m ³)
1	300	0,12	56	4800
2	600	0,12	85	7250
3	300	0,22	62	5250
4	600	0,22	89	7700
5	300	0,17	59	5100
6	600	0,17	87	7310
7	450	0,12	70	6000
8	450	0,22	85	7250
9	450	0,17	73	6300
10	450	0,17	74	6400
11	450	0,17	74	6400

Fonte: Autor, 2022.

4.3.1. Concentração do Metano

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 6, pode-se verificar que a maior concentração de metano foi obtida nos ensaios “4” e “6”, com 89% e 87% de concentração de metano, respectivamente. Esses percentuais foram alcançados com o emprego de uma concentração de absorvente de 0,22 e 0,17 mol/L, e com vazão da solução de 600 L/h empregado em ambos os ensaios.

Em contrapartida, a menor concentração de metano foi encontrada nas condições onde, tanto a concentração do absorvente (0,12 mol/L) quanto a vazão da solução (300 L/h) eram as mínimas, indicando um favorecimento na obtenção de maiores percentuais de metano ao utilizar uma solução do absorvente mais concentrada e com maior vazão do solvente.

Por meio da regressão linear foi gerado o intervalo espectral que relaciona a concentração de metano com a vazão da solução e a concentração do absorvente. Na Tabela 7 são apresentados os efeitos da interação entre as variáveis para o resultado de concentração do metano das amostras coletadas.

Tabela 7 - Coeficientes de regressão do Planejamento DFC.

Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	74,47	1,51	49,34	0
X ₁	14,00	1,20	11,66	0,00001
X ₁ ²	-2,68	1,85	-1,45	0,2062
X ₂	4,17	1,20	3,47	0,0179
X ₂ ²	1,82	1,85	0,98	0,3711
X ₁ -X ₂	-0,50	1,47	-0,34	0,7478

Fonte: Autor, 2022.

Conforme a Equação 01 gerada por meio da análise de regressão, esta descreve a relação estatística entre os fatores de variância aqui expostos.

$$\text{Concentração do metano} = 74,47 + 14 X_1 - 2,68 X_1^2 + 4,17 X_2 + 1,82 X_2^2 - 0,50 X_1 X_2 \text{ (Eq. 01)}$$

Onde: X₁ = Vazão do solvente (L/h); X₂ = Concentração do absorvente (mol/L).

A análise de variância (ANOVA) da concentração de metano das amostras de biogás após passar pelo sistema de purificação é apresentada na Tabela 8, e este foi realizado com o objetivo de verificar a qualidade do ajuste do modelo matemático obtido.

Tabela 8 - ANOVA para purificação de biogás de Aterro Sanitário visando elevação da concentração de metano na saída do sistema.

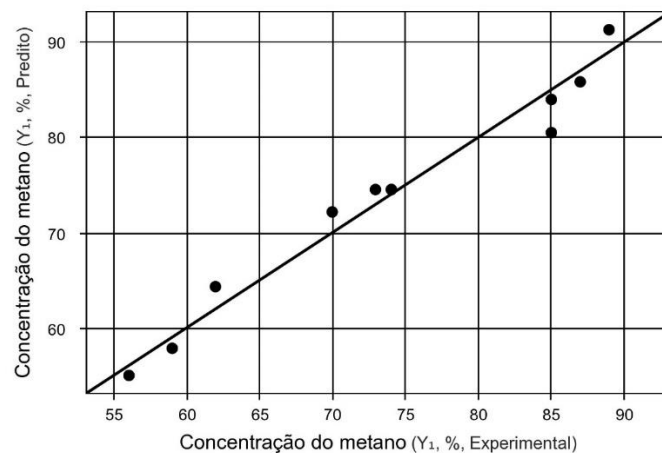
Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	F calculado	P valor
Regressão	1302,7	5	260,5	30,1	0,00097
Resíduos	43,30	5	8,7		
Falta de ajuste	42,6	3	14,2	42,6	0,02302
Erro puro	0,7	2	0,3		
Total	1346,0	10			

R² = 96,78%

Fonte: Autor, 2022.

Com o modelo linear ajustado, observa-se que o coeficiente de regressão (R^2) alcançado foi de 0,9678, indicando um bom ajuste do modelo aos dados. Graficamente representada, a Figura 12 comprova que o modelo obtido apresenta uma boa qualidade, confirmado pelo agrupamento de pontos próximo a linha representativa e que não foi obtido nenhum valor com um alto grau de dispersão.

Figura 12 - Valores Experimentais x Valores Preditos para a concentração do metano.

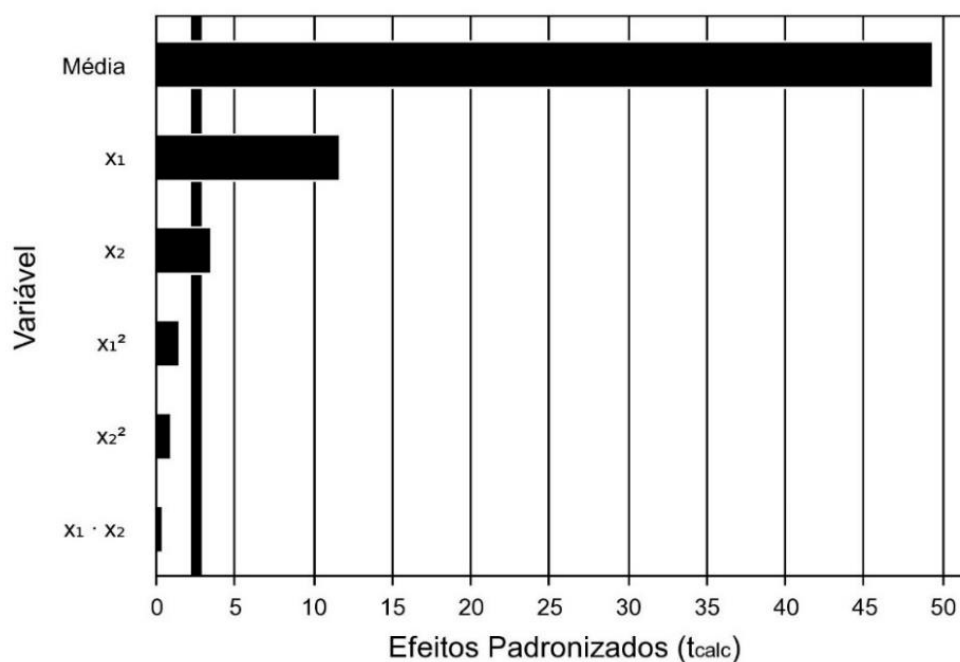


Fonte: Autor, 2022.

O Diagrama de Pareto ilustrado na Figura 13 destaca quais variáveis tem efeitos mais significativos, sendo: vazão de solução (X_1) e concentração do absorvente (X_2), bem como a interação entre esses dois fatores.

O efeito de cada fator é representado por barras, enquanto a linha lateral esquerda indica o valor mínimo para que um fator tenha efeito significativo na análise estatística. Observa-se que 80% desta consequência está relacionado a vazão do solvente, o que corresponde a 20% das causas apresentadas neste conjunto de fatores.

Figura 13 - Representação do Diagrama de Pareto.

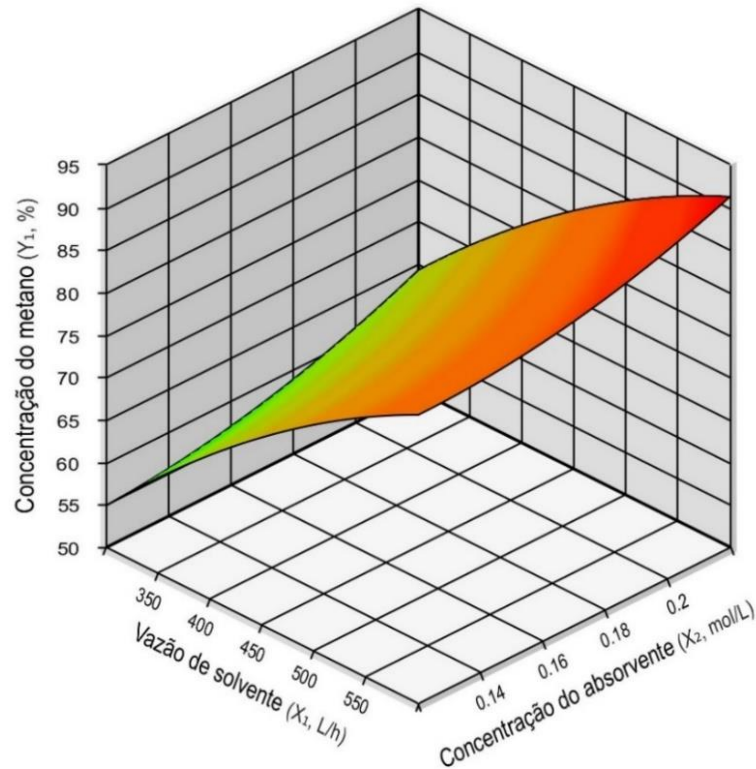


Fonte: Autor, 2022.

A partir do Diagrama de Pareto obtido neste trabalho, é possível afirmar que a vazão do solvente ($t_{calc} = 11,66$) foi a variável que apresentou maior efeito significativo na análise experimental, seguido da concentração do absorvente ($t_{calc} = 3,47$), com um valor bem menor de significância.

O gráfico de superfície de resposta gerado por meio do planejamento experimental é apresentado na Figura 14. É possível notar que a concentração do metano foi alcançada em condições de alta quantidade de vazão do solvente e alta concentração do absorvente, como mostra as regiões destacadas em vermelho.

Figura 14 - Superfície de resposta.



Fonte: Autor, 2022.

Por meio do gradiente de cores apresentados, nota-se que a vazão do solvente é fator determinante para obtenção de altos teores de metano. É possível também verificar que a concentração do absorvente exerce certa influência na concentração final do metano.

4.3.2. Poder calorífico do biogás

O grau de capacidade máxima do poder calorífico do biogás indica a eficiência do processo de purificação do biogás nas condições em que este foi submetido. O maior valor de poder calorífico de biogás encontrado foi de 7700 Kcal/m³ com o ensaio 6, como exposto na Tabela 6. A Tabela 9 traz os dados resultantes da interação entre as variáveis deste estudo para o resultado do poder calorífico do biogás originário da purificação do biogás de Aterro Sanitário.

Tabela 9 - Coeficientes de regressão do Planejamento DFC para definição do poder calorífico de biogás.

Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	6411,58	118,75	53,99	0,0000
X ₁	1185,00	94,51	12,54	0,0001
X ₁ ²	-273,95	145,44	-1,88	0,1183
X ₂	358,33	94,51	3,79	0,0127
X ₂ ²	146,05	145,44	1,00	0,3614
X ₁ -X ₂	0,00	115,75	0,00	1,0000

Fonte: Autor, 2022.

De acordo com a Equação 2 gerada pela análise de regressão, e que está aqui representada:

$$\text{Poder calorífico do biogás} = 6411,58 + 1185 X_1 - 273,95 X_1^2 + 358,33 X_2 + 146,05 X_2^2 + 0 X_1 X_2 \text{ (Eq. 02)}$$

Onde: X₁ = vazão do solvente; X₂ = concentração do absorvente.

A Tabela 10 demonstra a análise de variância (ANOVA) do poder calorífico do biogás após purificação com utilização de solução de hidróxido de cálcio.

Tabela 10 - ANOVA para purificação de biogás de Aterro Sanitário visando elevação do poder calorífico do biogás.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calculado	P valor
Regressão	9400419,8	5	1880084	35,1	0,00067
Resíduos	267943,90	5	53588,8		
Falta de ajuste	261277,2	3	87092,4	26,1	0,03709
Erro puro	6666,7	2	3333,3		
Total	9668363,6	10			

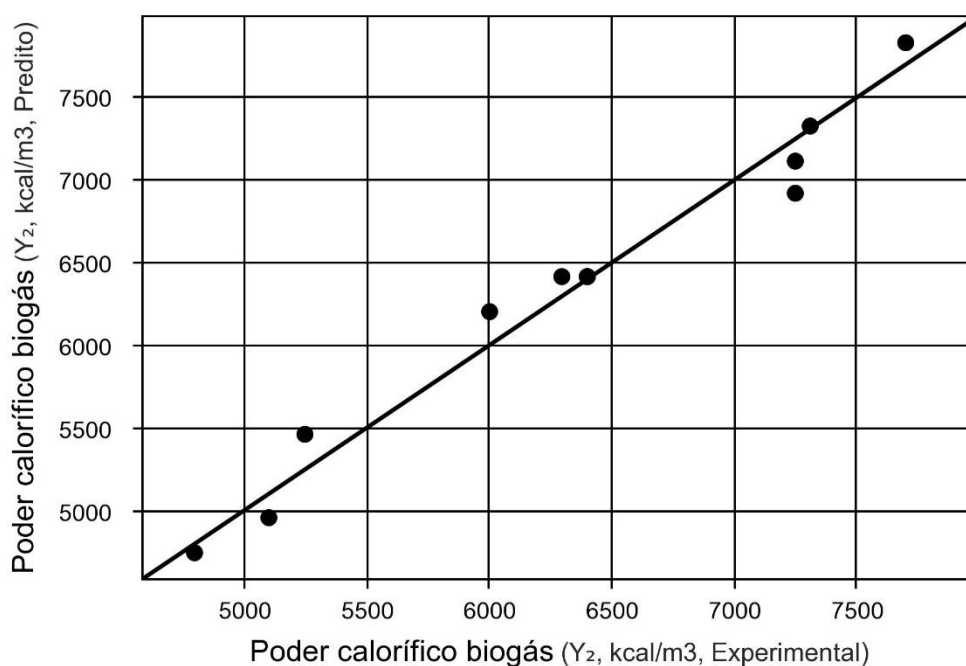
R² = 97,23%

Fonte: Autor, 2022.

Analisando a significância estatística através do Teste-F, podemos observar que o $F_{\text{calculado}}$ (35,1) é maior que o valor de F_{tabelado} (5,05), então o ajuste é significativo. Com o modelo linear ajustado, observa-se que o coeficiente de determinação (R^2) alcançado foi de 0,9723, reafirmando um bom ajuste do modelo de dados.

A Figura 15 mostra os valores analisados em comparação aos valores pressupostos para o teste do poder calorífico do biogás.

Figura 15 - Valores Analisados x Valores Preditos do poder calorífico do biogás.

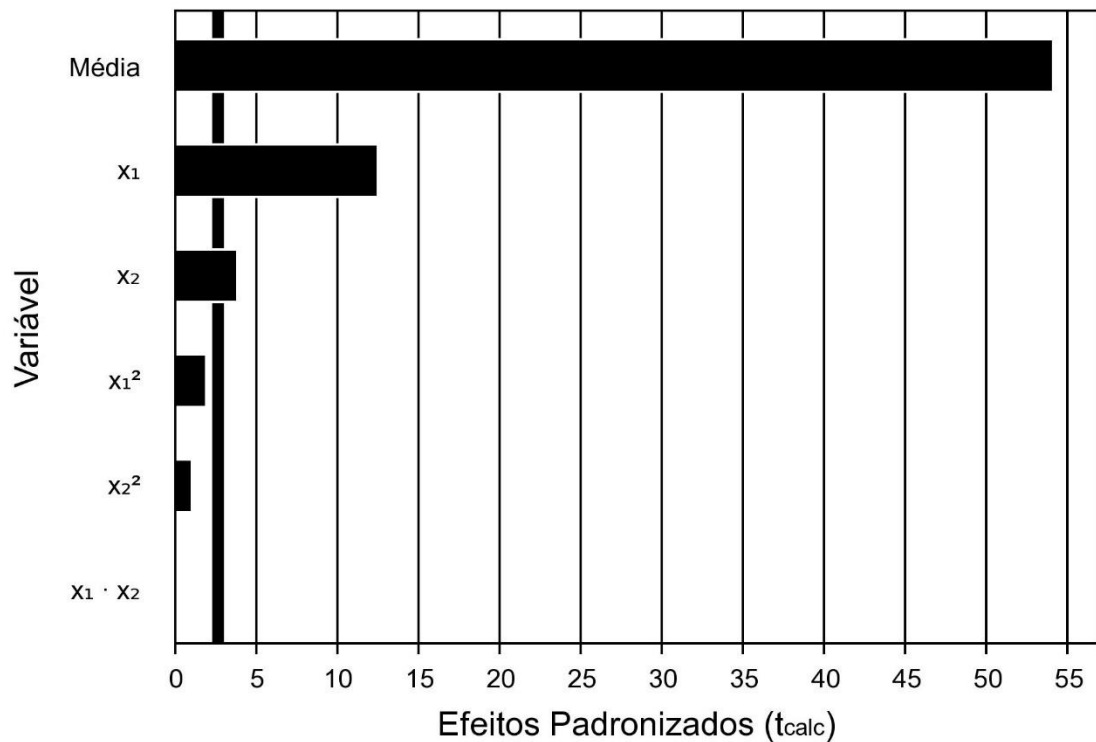


Fonte: Autor, 2022.

Os valores bem ajustados representado pelas proximidades dos pontos a linha central ajustada constata-se que dentro deste intervalo de dados fica condicionado que alterações na variável preditora implica em mudanças na variável resposta. Tal fato também é justificado pelo p-valor baixo presente na análise da regressão.

O Diagrama de Pareto representado pela Figura 16 demonstra o efeito significativo das variáveis vazão do solvente (X_1) e concentração do absorvente (X_2) atribuído ao poder calorífico do biogás, demonstrando que o fator vazão do solvente ($t_{\text{calc}} = 12,54$) foi o efeito mais significativo na análise experimental.

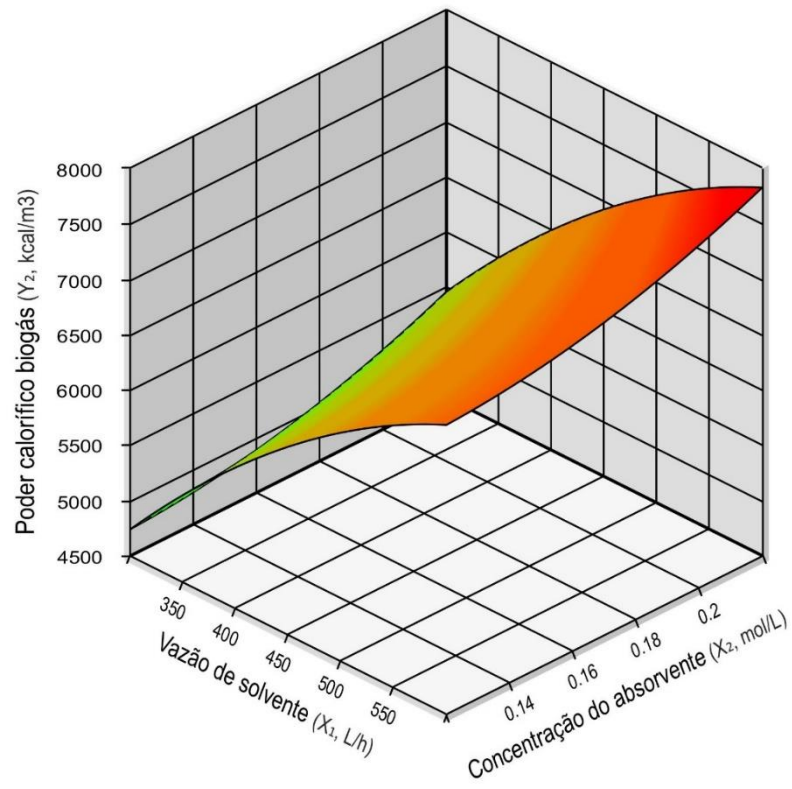
Figura 16 - Gráfico de Pareto do poder calorífico do biogás.



Fonte: Autor, 2022.

Na Figura 17 que representa a superfície resposta, pode-se verificar que a capacidade máxima do poder calorífico do biogás de aterro sanitário após tratamento com solução de hidróxido de cálcio, foi obtido em circunstâncias de alta vazão do solvente e alta concentração do absorvente, conforme ilustra a área em vermelho.

Figura 17 - Gráfico de superfície que representa a capacidade máxima do poder calorífico do biogás.



Fonte: Autor, 2022.

Através do gradiente de cores apresentados, nota-se que a vazão do absorvente é o fator determinante para obtenção de altos teores do poder calorífico do biogás de Aterro Sanitário.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho foi realizado para desenvolver um sistema de purificação de biogás proveniente do Aterro Sanitário de Palmas – TO, de baixo custo, usando lavador de gases com solução de dióxido de carbono para remoção de CO_2 e aproveitando o seu poder energético.

Os valores dos componentes CO_2 e CH_4 do biogás foram determinados antes e depois do tratamento, para se estimar a eficiência do sistema empregado. A análise do biogás bruto mostrou uma porcentagem de 50% de metano. A vazão da solução de hidróxido de cálcio variou de 300 a 600 L/h, enquanto as concentrações de Ca(OH)_2 utilizadas no tratamento variaram de 0,12 a 0,22 mol/L.

Os resultados dos testes mostraram que, após o tratamento de purificação aqui adotado, a composição do metano no biogás foi para 89% empregando uma vazão de 600 L/h e concentração de 0,17 e 0,22 mol/L da solução alcalina. A partir do estudo, foi constatado que o fator que mais contribuiu para a redução na quantidade de dióxido de carbono e consequentemente no aumento do valor do metano, foi a vazão do solvente seguido de uma pequena relevância da concentração do absorvente.

O maior poder calorífico do biogás tratado foi obtido nas seguintes condições: vazão da solução de 600 L/h, e concentração de 0,17 e 0,22 mol/L.

Baseado nos resultados obtidos com esta pesquisa podemos concluir que: a variável vazão do solvente foi responsável, majoritariamente, pelo alto teor de metano e poder calorífico do biogás alcançados. Dito isso, recomenda-se a operação do lavador de gases com uma concentração de solução absorvente igual a 0,17 mol/L, uma vez que promove uma maior economia durante a operação do sistema por conter uma quantidade menor de hidróxido de cálcio.

Além dos bons resultados obtidos, é possível afirmar também que o funcionamento da unidade se comprova eficiente.

Sugere-se para futuras pesquisas que o biogás após tratado seja avaliado quanto as suas aplicabilidades em motores de combustão e sistemas de geração de energia elétrica, estudando-se futuramente o desempenho, produtividade, emissões de poluentes e potenciais impactos.

REFERÊNCIAS

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. São Paulo, 2000. p. 164. Disponível em:< <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-09032012-090952/pt-br.php>>. Acesso em: 08 de abr de 22.

ALVES, L; COLARES, R; UTURBEY, W. **As atratividades ambientais e econômicas do uso do biogás produzido pelo aterro sanitário de Belo Horizonte para geração de energia elétrica**. Belo Horizonte, 2008. Disponível em:< <https://www.ppgee.ufmg.br/documentos/PublicacoesDefesas/839/SBSE0224.pdf>>. Acesso em: 13 de mar de 22.

ANTONIO, S. M. **Análise da variação da vazão e da concentração do metano presentes nos gases gerados no aterro sanitário de Rio Claro – SP**. São Paulo, 2012. p. 58. Disponível em:<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/118067/antonio_sm_tcc_rcla.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 de nov de 22.

BONDARIK, R; PILATTI, L. A; HORST, D. J. **Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil**. Interciência, vol. 43, núm. 10, 2018, outubro, pp. 660-688. Venezuela. Disponível em:< <https://www.redalyc.org/journal/339/33957861002/html/#:~:text=A%20matriz%20de%20energia%20prim%C3%A1ria,de%20fontes%20solares%20ou%20e%C3%B3licas.>>. Acesso em 27 de mar de 22.

BORBA, S. M. P. **Análise de modelos de geração de gases em aterros sanitários: estudo de caso**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em:< https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2386602/mod_resource/content/1/gas_em_aterro.pdf>. Acesso em 31 de mar de 22.

BRASIL. **(2022) Balanço Energético Nacional**. Ano Base 2021. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro e Ministério de Minas e Energia, Brasília, Brasil. 298 pag. Disponível em:< <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>. Acesso em: 11 de dez de 22.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário**. Brasília, 2018.

BRASIL. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Tocantins**. Palmas, 2016. Disponível em:<
<https://www.to.gov.br/semarh/plano-estadual-de-residuos-solidos-do-tocantins-persto/648eropgv1yj>>. Acesso em: 27 de mar de 22.

CARVALHO, L. S.; NEVES, S. B.; LIMA, Y; DUARTE, I. R. C.; TEIXEIRA, W. D.; SANTANA, M. L.; FERRARI, A. M. A. **Estudo da Tecnologia de Separação do CO₂ de Gases Industriais por Absorção com Monoetanolamina-MEA**. In anais do 4º PDPETRO, Campinas, outubro, 2007. Disponível em:<
http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/4/resumos/4PDPETRO_6_3_0417-1.pdf>. Acesso em: 13 de mar de 22.

FIGEIREDO, N. J. V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica: estudo de caso**. São Paulo, 2011. Disponível em<
<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-11082011-092549/pt-br.php>>. Acesso em: 30 de mar de 22.

FREDDO, A. **Estudo de remoção de dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio de biogás utilizando soluções absorvedoras**. Dissertação. Paraná, 2017. Disponível em:<
<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2950>>. Acesso em: 08 de abr de 22.

HAN, S.J; YOO, M; KIM, D.W; WEE, J. H. **Carbon Dioxide Capture Using Calcium Hydroxide Aqueous Solution as the Absorbent**. Department of Environmental Engineering. Energy&Fuels. Republic of Korea, 2011. Disponível em:<
[https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef200415p#:~:text=Ca\(OH\)2%20aqueous%20solution%20is%20used%20as%20an%20effective,reaction%20commonly%20observed%20in%20nature.>](https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef200415p#:~:text=Ca(OH)2%20aqueous%20solution%20is%20used%20as%20an%20effective,reaction%20commonly%20observed%20in%20nature.>). Acesso em: 08 de abr de 22.

KLAUS, O. L. **Potencial de aproveitamento de resíduos sólidos urbanos da mesorregião oeste do paraná para geração de energia elétrica**. Paraná, 2014. Disponível em:<
https://www5.unioeste.br/portalunioeste/arq/files/PPGEA/Dissertacao_Otavia_Klaus.pdf>. Acesso em: 03 de abr de 22.

LEITE, A. B; BERTOLI, S. L; BARROS, A. A. C. **Absorção química de dióxido de nitrogênio (NO₂)**. Fundo editorial ABES. Vol. 10, nº 1. Santa Catarina, 2005.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca – PE**. Recife, 2003. Disponível em:<

<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5806>>. Acesso em: 08 de abr de 22.

MACIEL, J. F. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. Recife, 2009. Disponível em:< <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5213>>.

Acesso em: 27 de mar de 22.

MAGALHÃES, E. A; SOUZA, S. N. M; AFONSO, A. D. L; RICIERI, R. P. **Confecção e avaliação de um sistema de remoção de CO₂ contido no biogás**. Paraná, 2004.

MARQUES, M. S. **Qualidade ambiental e estudo da produção e aproveitamento energético do biogás produzido pelo aterro sanitário de Palmas – TO**. Palmas, 2019.

MARTINS, A. C. N; RUGNO, I. Q. **Avaliação do processo de absorção de CO₂ em coluna de pulverização empregando soluções de NaOH e Ca(OH)₂**. São Paulo, 2021.

MELLO, L. C. **Estudo do processo de absorção de CO₂ em soluções de aminas empregando-se coluna recheada**. São Paulo, 2013.

MONTAGNA, T. B. **Biogás produzido em aterro sanitário como fonte de energia – uma revisão bibliográfica**. Paraná, 2013.

PECORA, V; VELÁZQUEZ, S. M. S. G; COELHO, S. T. **Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: estudo de caso em São Paulo**. São Paulo, 2008.

PINÃS, J. A. V; VENTURINI, O. J; LORA, E. E. S; OLIVEIRA, M. A; ROALCABA, O. D. C. **Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e biogás (Cetesb)**. Revista bras. Est. Pop. Rio de Janeiro, v. 33, n.1, p. 175-188, 2016.

POHLAND, F. G; HARPER, S. R. **Critical review and summary of leachate and gas production from landfills**. Office of Research and Development. EPA/600/2-86/073. Atlanta, Georgia, 1985.

RYCKEBOSCH, E; DROUILLON, M; VERVAEREN, H. **Techniques for transformation of biogas to biomethane**. Science Direct. Kortrijk, Bélgica, 2011.

- SILVA, L. A; CARVALHO, L. S; LOPES, W. A; PEREIRA, P. A. P; ANDRADE, J. B. **Solubilidade e reatividade de gases**. Universidade Federal da Bahia. Quim. Nova, vol. 40, nº 7, Bahia, 2017.
- SOUZA-FILHO, J. D. V. **Utilização de peneira molecular para purificação do gás de aterros sanitários**. Fortaleza, 2016.
- SRICHAT, A.; SUNTIVARAKORN, R.; KAMWILAISAK, K. **A Development of Biogas Purification System Using Calcium Hydroxide and Amine Solution**. Energy Procedia. Volume 138, 2017.p. 441-445. Disponível em:< <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217351391>>. Acesso em: 01 de out de 22.
- TEIXEIRA, C. D. **Valorização energética do biogás produzido nos aterros sanitários de resíduos urbanos**. Lisboa, Portugal. 2010.
- TELES, R. S; SALVADOR, J. A; NASCIMENTO, A.S. **Lavador de gases**. In: XXVI Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, São José do Rio Preto, 2003.
- TREYBAL, R. E; **Operaciones de transferencia de massa**. McGraw-Hill. ed.2, p. 865, Mexico, 1980.