



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS DE PALMAS  
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**RUI FELIPE DE MIRANDA RIOS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE PURIFICAÇÃO  
DE BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS/TO  
EMPREGANDO UM LAVADOR DE GÁS CONTENDO  
SOLUÇÃO DE  $\text{Ca(OH)}_2$**

Palmas/TO  
2022

**RUI FELIPE DE MIRANDA RIOS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE PURIFICAÇÃO  
DE BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS/TO  
EMPREGANDO UM LAVADOR DE GÁS CONTENDO  
SOLUÇÃO DE  $\text{Ca(OH)}_2$**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

Palmas/TO  
2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

- R586d Rios, Rui Felipe de Miranda.  
Desenvolvimento de um sistema de purificação de biogás do aterro sanitário de Palmas/TO empregando um lavador de gás contendo solução de  $\text{Ca(OH)}_2$ . / Rui Felipe de Miranda Rios. – Palmas, TO, 2022.  
77 f.  
Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em Engenharia Ambiental, 2022.  
Orientador: Marcelo Mendes Pedroza  
1. Metano. 2. Dióxido de carbono. 3. Aterro sanitário. 4. Lavador de gases.  
I. Título

**CDD 628**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

# FOLHA DE APROVAÇÃO

RUI FELIPE DE MIRANDA RIOS

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS DE ATERRO  
SANITÁRIO EMPREGANDO UM LAVADOR CONTENDO SOLUÇÃO  $\text{CA(OH)}_2$

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

## BANCA EXAMINADORA



---

Dr. Marcelo Mendes Pedroza (Presidente)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins



P/\_\_\_\_\_  
Dra. Claudia da Silva Aguiar Rezende (Membro Titular Interno)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins



P/\_\_\_\_\_  
Dr. João Evangelista Marques Soares (Membro Titular Externo)  
Escola de Governo – Prefeitura Municipal de Palmas – TO

Aprovada em: 03 de outubro de 2022

O evento foi realizado por meio de vídeo conferência, conforme Art. 56-A da Resolução nº 13, de 22 de março de 2017.

## **Dedico**

*Dedico este trabalho aos meus pais, Rui Adelino Rodrigues Rios e Miriam Lucia Miranda que sempre me apoiaram.*

*Em especial, dedico também a minha fiel companheira, Claudia Bueno, que esteve sempre comigo pra a realização dessa etapa tão importante na vida.*

*Dedico ao meu Orientador e amigo Marcelo Mendes Pedroza pela paciência e pelos ensinamentos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder força, sabedoria e perseverança nessa conquista.

Agradeço ao meu pai, Rui Adelino Rodrigues Rios, e a minha, mãe Miriam Lucia Miranda, que sempre me apoiam.

À minha companheira Cláudia Bueno que está sempre ao meu lado me ajudando em cada conquista.

Agradeço as pessoas que me ajudaram na realização deste trabalho, em especial aos Mestres Adeluzio Gomes de Azevedo e Wellington Dias da Silva, pela contribuição à pesquisa, aos Doutores Cláudia da Silva Aguiar Rezende e João Evangelista Marques Soares por fazerem parte da minha banca e ao Matheus Gomes Arruda que contribuiu significativamente na conclusão deste. Um especial agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor Marcelo Mendes Pedroza, pela paciência e dedicação aos seus orientandos.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho. Deixo aqui o meu muito obrigado.

## RESUMO

A concentração de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ), principais gases do efeito estufa, na atmosfera vem se aumentando com a intensificação das atividades humanas. Os aterros sanitários produzem grande quantidade de gases, chamados de biogás, que são compostos por aproximadamente 30 a 45% de  $\text{CO}_2$  e 55 a 70% de  $\text{CH}_4$ . O  $\text{CH}_4$ , por possuir um alto poder calorífico,  $9100 \text{ kcal/m}^3$ , pode ser usado para aproveitamento energético como uma alternativa sustentável e renovável. Nesse sentido, o presente trabalho procurou avaliar a remoção de  $\text{CO}_2$  e, com isso, o incremento da concentração do  $\text{CH}_4$ , do biogás oriundo do aterramento de resíduos sólidos urbano da cidade de Palmas, Tocantins, utilizando um protótipo de baixo custo de lavador de gases, seguindo um modelo de coluna de absorção, utilizando água destilada adicionado dióxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  a  $0,1 \text{ mol/L}$ ,  $0,15 \text{ mol/L}$  e  $0,2 \text{ mol/L}$  na absorção química do  $\text{CO}_2$  e uma variação de solução entre 281 a 608 L/h. Para a concretização dos objetivos dessa pesquisa foram desenvolvidas as seguintes etapas metodológicas: (a) medição de fluxo, (b) coleta e análise da amostra do biogás, (c) confecção do protótipo do projeto e (d) testes experimentais. Foi aferida uma vazão diária de biogás de  $4 \text{ m}^3$ . Os resultados obtidos através do experimento dessa pesquisa demonstraram alcançar valores de concentração de metano variando entre 71 a 86%. O maior valor de concentração de metano foi utilizando  $0,20 \text{ mol/L}$  para concentração da solução absorvedora e 281 e 608 L/h para variação das vazões da solução. Sendo assim, foi percebido que para alcançar maiores valores de concentração de metano independe da vazão da solução, mas sim da concentração da solução absorvedora. Além disso, alcançando uma concentração de metano de 86% conseguiu-se um poder calorífico de  $31.401 \text{ kJ/m}^3$ .

**Palavras-chave:** Metano; Dióxido de carbono; Aterro sanitário; Lavador de gases; Hidróxido de cálcio.

## ABSTRACT

The concentration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>), the main greenhouse gases, in the atmosphere has increased with the intensification of human activities. Landfills produce large amounts of gases, called biogas, which are composed of approximately 30 to 45% CO<sub>2</sub> and 55 to 70% CH<sub>4</sub>. CH<sub>4</sub>, due to its high calorific value, 9100 kcal/m<sup>3</sup>, can be used for energy use as a sustainable and renewable alternative. In this sense, the present work sought to evaluate the removal of CO<sub>2</sub> and, therefore, the increase in the concentration of CH<sub>4</sub>, of biogas from the landfill of urban solid waste in the city of Palmas, Tocantins, using a low-cost prototype of a gas scrubber. , following an absorption column model, using distilled water added calcium hydroxide Ca(OH)<sub>2</sub> at 0.1 mol/L, 0.15 mol/L and 0.2 mol/L in the chemical absorption of CO<sub>2</sub> and a variation of solution between 281 to 608 L/h. To achieve the objectives of this research, the following methodological steps were developed: (a) flow measurement, (b) collection and analysis of the biogas sample, (c) making the project prototype and (d) experimental tests. A daily biogas flow of 4m<sup>3</sup> was measured. The results obtained through the experiment of this research demonstrated to reach methane concentration values ranging from 71 to 86%. The highest value of methane concentration was using 0.20 mol/L for the concentration of the absorber solution and 281 and 608 L/h for the variation of the flow rates of the solution. Thus, it was noticed that to reach higher values of methane concentration it is not dependent on the solution flow, but on the concentration of the absorber solution. Furthermore, reaching a methane concentration of 86%, a calorific value of 31,401 kJ/m<sup>3</sup> was achieved.

**Keywords:** Methane; Carbon dioxide; Landfill; Gas scrubber; Calcium hydroxide.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama esquemático da metodologia proposta nesta pesquisa .....	32
Figura 2	Localização do Aterro Sanitário de Palmas/TO .....	33
Figura 3	Portaria de acesso do Aterro Sanitário de Palmas/TO .....	34
Figura 4	Disposição dos resíduos no Aterro Sanitário de Palmas/TO .....	35
Figura 5	Pontos de emissão de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – TO .....	36
Figura 6	Estação experimental de biogás do Aterro Sanitário de Palmas – TO .....	37
Figura 7	Medidor de gás GLP.....	38
Figura 8	Kit análise de biogás.....	39
Figura 9	Leitura e análise do tratamento de biogás.....	39
Figura 10	Solução absorvente.....	41
Figura 11	Esquema do sistema de purificação de biogás.....	41
Figura 12	Protótipo do purificador de biogás.....	43
Figura 13	Representação do planejamento experimental utilizado no processo de purificação do biogás proveniente do Aterro Sanitário de Palmas/TO (Delineamento de Faces Centradas - DFC) .....	44
Figura 14	Valores Experimentais versus Valores Preditos, para a Concentração de Metano.....	54
Figura 15	Representação do Diagrama de Pareto.....	55
Figura 16	Superfície de Resposta.....	56
Figura 17	Curva de Contorno .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Níveis dos Fatores empregados no Planejamento Experimental, durante o tratamento de biogás .....	44
Tabela 2	Ordem dos experimentos empregados no Delineamento de Faces Centradas (DFC) .....	45
Tabela 3	Dados obtidos nos testes iniciais de purificação de biogás do Aterro Sanitário de Palmas/TO.....	48
Tabela 4	Análise estatística através do Teste-t simulando variâncias equivalentes nos testes de purificação de biogás .....	49
Tabela 5	Resultados do Planejamento $2^2$ com ponto central obtido para a concentração de metano após o tratamento do biogás .....	51
Tabela 6	Coefficientes de regressão do Planejamento $2^2$ com pontos centrais em um intervalo com 95% de confiança.....	52
Tabela 7	ANOVA para purificação de biogás de Aterro Sanitário visando elevação da concentração de metano na saída do sistema.....	53
Tabela 8	Resultados do Planejamento Composto Central (DCC) obtido para o poder calorífico do biogás após processo de purificação.....	58

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Geração de Resíduos Sólidos Anual e População de Palmas/TO.....	46
Gráfico 2	Acumulado de vazão do biogás ao longo do dia (m <sup>3</sup> ).....	47

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVO.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1</b>	<b>Efeito estufa.....</b>	<b>19</b>
<b>4.2</b>	<b>Resíduos sólidos.....</b>	<b>20</b>
<b>4.3</b>	<b>Aterro sanitário.....</b>	<b>20</b>
<b>4.4</b>	<b>Produção de biogás.....</b>	<b>21</b>
<b>4.5</b>	<b>Limpeza do biogás.....</b>	<b>22</b>
4.5.1	Remoção da Água.....	22
4.5.2	Remoção de H <sub>2</sub> S.....	23
4.5.3	Remoção de Oxigênio e Nitrogênio.....	23
4.5.4	Remoção de Amoníaco.....	24
4.5.5	Remoção de Siloxanos.....	24
<b>4.6</b>	<b>Purificação do biogás.....</b>	<b>24</b>
4.6.1	Remoção de CO <sub>2</sub> .....	25
4.6.1.1	<i>Adsorção.....</i>	25
4.6.1.2	<i>Absorção físico e química.....</i>	25
4.6.1.3	<i>Separação criogênica.....</i>	26
4.6.1.4	<i>Separação por Membranas.....</i>	27
4.6.1.5	<i>Remoção biológica.....</i>	27
<b>4.7</b>	<b>Poder calorífico do biogás.....</b>	<b>28</b>
<b>4.8</b>	<b>Aproveitamento energético do biogás.....</b>	<b>28</b>

4.8.1	Geração de energia elétrica.....	29
4.8.1.1	<i>Turbinas a Gás</i> .....	29
4.8.1.2	<i>Microturbinas a gás</i> .....	29
4.8.1.3	<i>Motores de Combustão Interna</i> .....	30
4.8.2	Geração de energia térmica.....	30
4.8.2.1	<i>Ciclo a vapor Rankine</i> .....	30
4.8.2.2	<i>Evaporador de chorume ou lodo de Estação de tratamento de esgoto</i> .....	30
4.8.3	Produção de combustível veicular.....	30
4.8.4	Injeção em rede de gás natural.....	30
<b>4.9</b>	<b>Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)</b> .....	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>32</b>
<b>5.1</b>	<b>Localização e descrição da área</b> .....	<b>32</b>
<b>5.2</b>	<b>Medição de fluxo</b> .....	<b>36</b>
<b>5.3</b>	<b>Coleta e análise da amostra</b> .....	<b>38</b>
<b>5.4</b>	<b>Sistema de purificação do biogás</b> .....	<b>40</b>
<b>5.5</b>	<b>Testes iniciais</b> .....	<b>42</b>
<b>5.6</b>	<b>Planejamento experimental</b> .....	<b>42</b>
5.6.1	Delineamento de Faces Centradas (DFC).....	43
<b>5.7</b>	<b>Determinação do poder calorífico do biogás</b> .....	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>46</b>
<b>6.1</b>	<b>Geração de Resíduos sólidos em Palmas/TO</b> .....	<b>46</b>
<b>6.2</b>	<b>Medição de vazão</b> .....	<b>47</b>
<b>6.3</b>	<b>Testes iniciais</b> .....	<b>48</b>
<b>6.4</b>	<b>Planejamento experimental</b> .....	<b>51</b>
<b>6.5</b>	<b>Avaliação do poder calorífico</b> .....	<b>58</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>60</b>

<b>7.1</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>60</b>
<b>7.2</b>	<b>Recomendações .....</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As atividades dos sistemas naturais, como vulcões e terremotos, bem como a intensificação das atividades humanas, desde a revolução industrial, principalmente com o uso de combustíveis fósseis, processos industriais, incêndios florestais e produção de lixo, têm aumentado a concentração de determinados gases na atmosfera, como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ), que são os principais responsáveis pelos gases de efeito estufa (LETCHER, 2021; YUE; GAO, 2018).

Porém, se comparado ao dióxido de carbono, o metano possui potencial de aquecimento global 25 vezes superior. O efeito conjunto de tais substâncias pode vir a causar um aumento da temperatura global estimado entre 0,3 e 4,8°C (REICHLER, 2020).

Um dos problemas ambientais considerados no aterramento dos resíduos sólidos é a emissão do biogás, mistura gasosa combustível produzida pela digestão anaeróbia da matéria orgânica, composto por aproximadamente 30 a 45% de dióxido de carbono e 55 a 70% de metano. Traços de sulfeto de hidrogênio, nitrogênio, monóxido de carbono e oxigênio também estão presentes no biogás (GARCILASSO, 2010; DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). Além disso, a produção de biogás é preocupante do ponto de vista local (odores e efeitos sobre a saúde), regional e global (efeito estufa).

Os gases produzidos nos aterros de resíduos sólidos, quando não são transportados para o aproveitamento energético, ou mesmo para produção de calor, são queimados na saída dos drenos verticais, que estão abertos, lançando gases de efeito estufa na atmosfera.

O biogás de aterros sanitário contém um volume enorme de metano e o seu aproveitamento tem recebido bastante atenção por ser uma alternativa sustentável e renovável (GUGLIUZZA; BASILE, 2013).

Para que o metano do biogás de Aterro Sanitário possa ser utilizado como combustível é necessário tratamento prévio visando à remoção de  $\text{CO}_2$ , 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, 2017). Além disso, a aplicação do biogás como combustível, sem remoção de sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), conduz à formação de dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), que é um outro poluente tóxico e um dos principais contribuintes para a chuva ácida na atmosfera (HORIYAMA *et al.*, 2004).

O tratamento e purificação de biogás podem contribuir com os seguintes aspectos: (a) aumentar a proporção de gás metano, (b) reduzir a corrosão e os danos em metais e peças e (c) alterar os atributos do biogás para torná-lo mais semelhante ao gás natural (TORRES *et al.*, 2020).

Existem várias maneiras de aproveitar o potencial energético presente nos resíduos sólidos descartados nos aterros. A utilização da biomassa como fonte energética provoca a melhoria nas condições operacionais, e de monitoramento, dos aterros sanitários podendo até gerar receita pela obtenção de créditos de carbono e venda de eletricidade. Além disso, contribui com a redução de outros gases de efeito estufa lançados na atmosfera (NASCIMENTO *et al.*, 2019). Entretanto, para que o biogás gerado seja captado em grande volume sem perdas para atmosfera, o aterro deve estar em conformidade com as normas nacionais além de um sistema de captação eficiente de biogás disponibilizado para exploração energética.

O Aterro Sanitário de Palmas/TO, criado em 21 novembro de 2001, representa um projeto dos poucos da Região Norte que atende as especificações ambientais exigidas pela legislação vigente. O aterro recebe em média 340 toneladas de resíduos sólidos urbanos diariamente. A disposição dos resíduos é feita em valas, revestidas com manta PEAD (Polietileno de Alta Densidade), com dimensões de 180 metros de comprimento, 60 metros de largura e 2,5 metros de profundidade e sistema de drenagem de gases e lixiviados (PREFEITURA MUNICIPAL DE PALMAS, 2009).

De acordo com Coelho e Oliveira (2012), a produção estimada de biogás no Aterro de Palmas/TO vem aumentando durante os anos. Conforme os pesquisadores, as vazões teóricas de biogás nos anos de 2008, 2009 e 2010 foram de 40,44; 41,84 e 42,94 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo apresentar alternativas de purificação de biogás proveniente do Aterro Sanitário de Palmas/TO. O tratamento foi realizado em uma coluna de lavagem (tipo “*spray tower scrubbers*”) de gás através da absorção com reação química com a remoção do gás CO<sub>2</sub> em solução de Ca(OH)<sub>2</sub>.

## 2 JUSTIFICATIVA

Hoje, nas grandes cidades do país, a maior parte dos resíduos sólidos urbanos gerados são destinados para aterros sanitários, onde a decomposição da matéria orgânica produz grandes quantidades de biogás, as quais são queimadas sem qualquer aproveitamento e pré-tratamento (OKAMURA, 2013). A combustão do biogás em queimadores (*flare*), as vezes feitas em aterros, não é suficiente para eliminar o problema da poluição atmosférica, pois é uma queima sem controle e, portanto, pouco eficiente (REGATTIERI, 2009).

A geração de biogás é uma das principais causas de poluição ambiental encontrada em aterros sanitários. Enquanto a matéria orgânica aterrada estiver em processo de decomposição a geração de biogás será contínua, até mesmo após o encerramento das atividades do aterro (FEAM, 2010). Conforme Bogner *et al.* (2008), a emissão do CH<sub>4</sub> de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto equivale a 18% das emissões antropogênicas de CH<sub>4</sub> em todo o mundo.

Segundo a OMS (2000), dentre os principais problemas locais advindos da emissão descontrolada de biogás, decorrente da decomposição dos resíduos sólidos, estão os prejuízos causados à saúde humana e à vegetação. Além do mais, a exposição à alguns constituintes do biogás podem causar câncer e outras doenças que atacam fígado, rins, pulmões e o sistema nervoso central. Outro efeito negativo é o inconveniente causado por odores desagradáveis que podem gerar distúrbios emocionais em indivíduos que residem em áreas próximas aos aterros, além de favorecer a desvalorização das propriedades (GARCILASSO *et al.*, 2010).

As emissões do biogás podem causar danos ao meio ambiente, seres humanos e animais. Por outro lado, o biogás é uma fonte atraente de energia devido ao seu alto teor de CH<sub>4</sub>. No entanto, a utilização direta de biogás como combustível, sem a purificação eficiente poderá gerar problemas nas peças de motores, além de conduzir a geração de outros poluentes atmosféricos, como o SO<sub>2</sub> (HORIKAWA *et al.*, 2004). Várias técnicas de purificação de biogás vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de potencializar o seu uso.

Segundo Marques e Azevedo (2019), através da modelagem ambiental do método de estimativa de geração de biogás para aterros sanitários de resíduos sólidos, o Aterro Sanitário de Palmas/TO possui uma geração de biogás de aproximadamente 1.170m<sup>3</sup>/h, suficiente para o abastecimento de 3.251 unidades habitacionais no município.

Neste contexto, o desenvolvimento do projeto proposto será de suma importância nas áreas de pesquisa e desenvolvimento e inovação tecnológica, no retorno do conhecimento acadêmico para a sociedade e, principalmente, para as comunidades próximas a aterros

sanitários. Além disso, há poucas publicações, na literatura científica, sobre a purificação de biogás na Região Norte do Brasil.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo Geral**

Avaliar a remoção de CO<sub>2</sub>, além do incremento da concentração do CH<sub>4</sub>, no biogás oriundo do aterramento de resíduos sólidos urbano da cidade de Palmas/TO utilizando lavador de gases com adição de aditivo na água de lavagem, submetidos a variações construtivas e operacionais.

### **3.2 Objetivos Específicos**

- Comparar a produção de resíduos sólidos urbanos na cidade de Palmas/TO ao longo do tempo;
- Aferir a vazão de biogás em célula de disposição de resíduos do Aterro Sanitário de Palmas/TO;
- Avaliar a composição do biogás bruto do aterro e, em seguida, sua composição após processo de tratamento;
- Implantar um protótipo de lavador de gases de baixo custo de fabricação e operação;
- Avaliar a influência da adição do reagente químico Ca(OH)<sub>2</sub> na absorção com reação química do gás CO<sub>2</sub>;
- Avaliar o poder calorífico.

## 4 REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 Efeito estufa

Com o passar dos anos, a rápida urbanização e as atividades industriais aumentaram as concentrações de poluentes atmosférico. Qualquer gás capaz de absorver e emitir radiação infravermelha é responsável pelo efeito estufa (RAO *et al.*, 2017).

A ligação entre o CO<sub>2</sub> e o aquecimento global tem atraído a atenção de cientistas e políticos, bem como do público em geral, graças ao conhecido 'efeito estufa'. A radiação solar passa em grande parte desimpedida pela atmosfera, aquecendo a superfície da Terra. Por sua vez, a energia é reemitida na forma de infravermelho, onde a maior parte é absorvida pelo CO<sub>2</sub> e pelo vapor d'água na atmosfera. Sem esse efeito estufa natural a temperatura média da superfície da Terra seria aproximadamente -21°C (ANDERSON *et al.*, 2016).

Os principais gases de efeito estufa (GEE) são o metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Está comprovado o aumento das concentrações de CO<sub>2</sub> no planeta. Isto pode ser constatado nas geleiras das calotas polares, que nos últimos dois séculos foi observado a elevação das concentrações desse gás. As emissões de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> representam aproximadamente 98% do inventário total de GEE em todo o mundo. O CO<sub>2</sub> representa aproximadamente 77% das emissões totais de GEE, enquanto CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O são emitidos em menor extensão (14% e 8%, respectivamente), porém exibem aquecimento global potenciais 23 e 298 vezes maiores do que o CO<sub>2</sub>, respectivamente (LOPEZ *et al.*, 2013).

A mudança climática é um grande problema que a humanidade enfrenta. Na Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, realizada em Paris, no final de 2015, vários países concordaram com um plano para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, e outros gases de efeito estufa, com o intuito de limitar o aumento da temperatura média global 2°C acima dos níveis pré-industriais (ANDERSON *et al.*, 2016).

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), os últimos resultados das projeções do aumento da temperatura global indicam que o aumento da temperatura ao longo do século XXI ficará entre 1,0 e 3,7° C, dependendo das futuras emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2013).

## 4.2 Resíduos sólidos

Resíduos sólidos, comumente chamados de lixo, são gerados pelas sociedades modernas como subprodutos das necessidades dos consumidores de hoje. O tipo e a quantidade de lixo gerado por uma comunidade dependem de sua cultura e da renda per capita. A produção de resíduos per capita varia de 0,05 kg até 2 kg por dia (BLIGHT, 2011).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei no 12.305 de 2010, define em seu artigo 3º, inciso XVI, os resíduos sólidos como:

[...] materiais, substâncias, objetos ou bens descartados, que são resultantes das atividades humanas em sociedade. Os resíduos encontram-se nos estados sólido ou semissólido, bem como na forma de gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Ainda na mesma Lei, inciso XV, há o conceito de rejeito como “resíduo sólido que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresente outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada”.

A Norma Brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos em dois grupos conforme os riscos potenciais ao meio ambiente, sendo: Perigosos - Classe I (são classificados segundo suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade) e Não perigosos - Classe II (que podem ser: Não Inertes: possuem propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água; Inertes: Não têm constituinte algum solubilizado em concentração superior ao padrão potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor).

## 4.3 Aterro Sanitário

Em um Aterro Sanitário os Resíduos Sólidos Urbanos são depositados em uma vala pré-existente, em um pedaço conveniente de terreno não utilizado ou em uma encosta. A construção de um Aterro Sanitário se faz em uma base impermeável, coberta com um sistema de drenagem projetado para coletar o lixiviado (chorume) gerado pelos resíduos e o sistema de drenagem dos gases. A deposição de cada dia é formada em uma camada de

cerca de dois metros de espessura, onde é compactada para reduzir seu volume e maximizar a utilização do espaço. Cada camada é coberta ao final do dia para evitar chuva, insetos e pássaros e animais necrófagos. O lixiviado coletado é tratado para purificá-lo antes de despejá-lo no sistema de águas superficiais. Os gases são queimados ou captados (BLIGHT, 2011).

Um Aterro Sanitário requer operação e monitoramento, como, equipamentos, controle de entrada de resíduos, métodos de enchimento e colocação de resíduos, compactação de resíduos e colocação da cobertura diária, além de segurança e proteção. Já o monitoramento envolve o controle do lixiviado, ar, água subterrânea e revestimento. O objetivo do monitoramento é verificar se as condições de licenciamento são corretamente cumpridas e todos os processos do aterro são executados conforme previsto (AZEVEDO, 2021).

Os projetos de aterros sanitários devem ser desenvolvidos em conformidade com o monitoramento e controle de emissões prevendo-se que atinjam um equilíbrio ambiental em um período não superior a uma geração (30 anos aproximadamente). Os resultados também devem ser fornecidos às autoridades e devem ser acessíveis ao público (BLIGHT, 2011; COSSU, 2018).

A Norma Brasileira, NBR 8419 (ABNT, 1992) define este sistema de disposição final como:

[...] técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

#### **4.4 Produção de biogás**

Por ser um recurso energético renovável, o biogás pode ser uma solução alternativa para as necessidades mundiais de energia e, ao mesmo tempo, auxiliar na redução de resíduos e emissões de gases de efeito estufa. Também é considerado neutro em carbono devido o carbono do biogás advir da matéria orgânica que capturou esse carbono da atmosfera em uma escala de tempo relativamente curta (AWE *et al.*, 2017).

O biogás é produzido a partir da metanação da biomassa e de resíduos orgânicos, por exemplo, digestão anaeróbia de lodo de esgoto, compostagem comercial, aterros sanitários

dentre outros. O biogás produzido durante digestão anaeróbia em aterros sanitários é conhecido como gás de aterro. É geralmente composto por metano (55 a 70%), dióxido de carbono (30 a 45%), nitrogênio (0 a 15%), oxigênio (0 a 3%), água (1 a 5%), além de pequenos traços de hidrocarbonetos, sulfeto de hidrogênio, amônia e siloxanos (PERSSON *et al.*, 2006; BAUER *et al.*, 2013).

O processo anaeróbico passa necessariamente por quatro fases a nível bacteriano, sendo elas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, na qual a geração do biogás ocorre na última etapa do processo (SAHA *et al.*, 2020).

O biogás tem o potencial de ser o possível substituto para os combustíveis fósseis, especialmente o gás natural. No entanto, o biogás bruto, produzido por meio do processo de digestão anaeróbia, contém um grande número de impurezas, como sulfato de hidrogênio e dióxido de carbono sendo necessário sua limpeza, e até mesmo purificação, antes de sua aplicação. O principal motivo para a purificação é evitar a corrosão e o desgaste mecânico do equipamento no qual o biogás será utilizado (SHAH *et al.*, 2021; PERSSON *et al.*, 2006).

#### **4.5 Limpeza do biogás**

Para aumentar a qualidade do biogás bruto, o gás geralmente é limpo de substâncias indesejadas. Como já dito, os principais componentes do biogás são o CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e outros compostos que prejudicam o potencial do biogás como biocombustível (PETERSSON; WELLINGER, 2007).

Conforme Monteiro (2011), podem-se distinguir duas realidades quanto ao nível do tratamento do biogás:

- Limpeza do Biogás: remoção de condensáveis, H<sub>2</sub>S, amoníaco, siloxanos e água.
- Purificação do Biogás: remoção do CO<sub>2</sub> (e eventualmente do N<sub>2</sub>) para melhorar o poder calorífico, e evitar danos, elevando-o para níveis próximos do Gás Natural.

#### 4.5.1 Remoção da Água

Segundo Ryckebosch *et al.* (2011), o biogás bruto é geralmente saturado com água, que pode condensar nos gasodutos e causar corrosão. Os métodos de remoção de água são geralmente baseados em separação física de água condensada ou secagem química.

Os métodos de secagem física (condensação), ao aumentar a pressão ou diminuir a temperatura, a água se condensará do biogás e poderá ser removida. Já a secagem química são técnicas onde a água é removida pela absorção (soluções de glicol ou o uso de sais higroscópicos.) e adsorção (sílica e alumina, por exemplo) (Ryckebosch *et al.*, 2011).

#### 4.5.2 Remoção de H<sub>2</sub>S

Além da destruição que sulfeto de hidrogênio pode ocasionar em tubulações e motores (efeito corrosivo na maioria dos metais), ele é perigoso para o meio ambiente, pois é convertido em dióxido de enxofre pela combustão (HAGEN; POLMAN, 2001).

As concentrações de H<sub>2</sub>S no biogás podem ser diminuídas por precipitação no líquido do digestor, pelo tratamento do gás ou durante a remoção do dióxido de carbono no enriquecimento do metano (PETERSSON; WELLINGER, 2007; PERSSON, 2003).

Segundo Krich *et al.* (2005), são técnicas de remoção do sulfeto de hidrogênio: a) Injeção de ar/oxigênio; b) Injeção de cloreto de ferro; c) Óxido de ferro; d) Carvão ativado; e) Lavagem com água; f) Lavagem com hidróxido de sódio e g) Filtro biológico.

#### 4.5.3 Remoção de Oxigênio e Nitrogênio

O oxigênio geralmente não compõe o biogás, uma vez que deve ser consumido pelos microrganismos aeróbios facultativos na produção do biogás. Sua presença indica que o ar penetrou no digestor ou coletor de gás de aterro. Oxigênio e nitrogênio podem estar contidos no gás de aterro se o gás for coletado sob pressão. Esses gases podem ser removidos por adsorção com carvão ativado, peneiras moleculares ou membranas. O oxigênio e o nitrogênio podem ser removidos por membranas ou por adsorção de oscilação de pressão de baixa temperatura, porém são compostos difíceis de remover, encarecendo o tratamento. Sendo assim, sua presença deve ser evitada, a menos que o biogás seja usado para fins menos exigentes (PETERSSON; WELLINGER, 2007).

#### 4.5.4 Remoção de Amônia

A amônia é formada na degradação das proteínas e geralmente ocorre em baixos níveis de biogás. A quantidade presente no biogás depende do pH e da composição do substrato no digestor. A amônia pode ser removida com unidades de carvão ativado e também pode ser removida em alguns processos de purificação, por exemplo, processos de adsorção e lavagem com água (HAGEN; POLMAN, 2001; PETERSSON; WELLINGER, 2007).

#### 4.5.5 Remoção de Siloxanos

Compostos orgânicos de silício ocorrem apenas ocasionalmente no biogás. São compostos que contêm uma ligação silício-oxigênio. Quando os siloxanos são queimados, o óxido de silício, um pó branco, é formado, o que pode criar um problema nos motores a gás. Os siloxanos podem ser removidos por resfriamento do gás, por adsorção em carvão ativado, alumínio ativado ou sílica gel, ou por absorção em misturas líquidas de hidrocarbonetos. Os siloxanos também podem ser removidos durante a separação do sulfeto de hidrogênio, conforme descrito no item 4.5.2 (PERSSON, 2003; PETERSSON; WELLINGER, 2007).

### 4.6. Purificação do biogás

A purificação do biogás para a qualidade do gás natural é um estágio de diversos procedimentos. Após a remoção da água, H<sub>2</sub>S, oxigênio e nitrogênio, NH<sub>3</sub> e siloxanos, a remoção de CO<sub>2</sub> é fundamental para alcançar a qualidade a qual se pretende o uso (HAGEN; POLMAN, 2001).

Os métodos de purificação do biogás dependem da finalidade de sua aplicação. Para o uso do biogás como gás combustível em usinas, somente a água e o H<sub>2</sub>S devem ser separados. Porém, em transporte por gasoduto ou combustível veicular, a remoção de CO<sub>2</sub> do biogás deve ser realizado, principalmente, para aumentar o valor de aquecimento do biometano, para reduzir os custos de transporte e, além disso, inibir a formação de corrosão e problemas operacionais. O biometano consiste tipicamente em 97 a 99% de metano e 1 a 3% de CO<sub>2</sub>. As especificações particulares de um gasoduto requerem um teor de CO<sub>2</sub> menor que 3%, enquanto as especificações de combustível veicular exigem 1,5% de CO<sub>2</sub> (RYCKEBOSCH *et al.* 2011, YANG; GE, 2016).

#### 4.6.1 Remoção de CO<sub>2</sub>

Conforme AWE (2017), as tecnologias atuais são: adsorção, absorção física e química, separação criogênica, separação por membrana e remoção biológica.

##### 4.6.1.1 Adsorção

Na adsorção, o CO<sub>2</sub> é capturado seletivamente na superfície do adsorvente por diferentes mecanismos. A adsorção física chama-se fisissorção, enquanto que usando produtos químicos denomina-se quimissorção (BHOWN; FREEMAN, 2011).

Já adsorção física, as moléculas alvo são atraídas para a superfície das paredes dos poros dentro de um sorvente de alta área superficial. Na adsorção química, o gás foco sofre uma reação química covalente para se ligar a certos locais no sorvente (BERGER; BHOWN, 2011).

A adsorção pressurizada, designada habitualmente por PSA (*Pressure Swing Adsorption*), é simples, uma mistura gasosa pressurizada é alimentada a um leito cheio de partículas adsorventes sólidas porosas onde acontece uma adsorção seletiva dos gases. A coluna de gás rico em metano passa enquanto o CO<sub>2</sub> é adsorvido. Os adsorventes mais comumente usados são, zeolite, carvão ativado, sílica gel e resinas sintéticas (MONTEIRO, 2011; AWE, 2017).

##### 4.6.1.2 Absorção físico e químico

Os processos de absorção compreendem métodos físicos e químicos usando água, reagentes e/ou solventes orgânicos. A lavagem com água é um método simples para enriquecer o biogás pois, como o CO<sub>2</sub> é mais solúvel do que o CH<sub>4</sub> acaba sendo removido juntamente com a água. As técnicas de absorção têm como fundamento a solubilidade dos gases em um determinado solvente. Essa técnica de baixo custo resulta em uma remoção de aproximadamente 95% de CO<sub>2</sub> e com concentrações finais de CH<sub>4</sub> variando entre 93 a 98% (BEIL; BEYRICH, 2013; PETERSSON *et al.*, 2009; DA SILVA; MEZZARI, 2019).

Para a lavagem do biogás, comumente, constroem-se reatores com material resistente à corrosão. Costumam ser cilíndricos, compridos e com pequeno diâmetro, para otimizar o tempo de reação e contato entre o CO<sub>2</sub> e o líquido de lavagem, contendo ou não soluções

químicas. A circulação interna do líquido acontece através de bombeamento (DA SILVA; MEZZARI, 2019).

Após a lavagem, a água pode ser regenerada usando uma coluna de dessorção, onde a água é colocada em contato com ar, vapor ou um gás inerte que volatiliza o CO<sub>2</sub> na água (RYCKEBOSCH *et al.*, 2011).

O processo acontece em uma coluna de absorção onde o biogás entra na parte de baixo e flui, em modo contracorrente ao fluxo do solvente, até a parte superior onde é coletado. O solvente usado pode ser a água ou solvente orgânico. O método de absorção geralmente chamado de lavagem com água pressurizada, a solubilização acontece em uma coluna de absorção, sob pressão interna entre 6 a 10 bar e temperatura ambiente (BAUER *et al.*, 2013; PETERSSON *et al.*, 2009).

A absorção química é o mesmo princípio da absorção física, porém há o acréscimo de uma substância produzindo a formação de ligações químicas reversíveis entre o soluto e o solvente. A substância química reage com o CO<sub>2</sub> eliminando-o do biogás (SALOMON, 2007; BEGGEL *et al.*, 2010).

O CO<sub>2</sub> é absorvido no líquido e reage à pressão quase atmosférica com o produto químico na coluna de absorção. Logo após, o produto químico é regenerado com vapor ou calor e o CO<sub>2</sub> pode possivelmente ser recuperado. Nesse processo, as taxas de recuperação do CH<sub>4</sub> são elevadas, resultando em valores próximos a 99,9% (RYCKEBOSCH *et al.*, 2011; DA SILVA; MEZZARI, 2019).

As desvantagens envolvem os custos com agentes químicos, a demanda energética pelo bombeamento contínuo da solução para a lavagem do biogás e, principalmente, a geração de um efluente líquido que necessita ser recuperado ou tratado antes de sua disposição final (DA SILVA; MEZZARI, 2019).

#### 4.6.1.3 Separação criogênica

Os processos criogênicos são realizados a temperaturas inferior a -50°C com o objetivo de separar o CH<sub>4</sub> do CO<sub>2</sub>. Como as temperaturas de condensação dos compostos do biogás são diferentes é fácil separar o CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> resfriando gradualmente a mistura e liquefazendo este último. Os primeiros gases a serem removidos são impurezas de baixa concentração, como água, sulfeto de hidrogênio, siloxanos e halogênios a uma temperatura de aproximadamente -25°C. Ao diminuir a temperatura, o próximo composto a ser condensado é o CO<sub>2</sub>. Dessa maneira, o CH<sub>4</sub> com alto teor de pureza sairá pelo topo da coluna na forma de

vapor enquanto o CO<sub>2</sub> será removido pelo fundo da coluna no estado líquido (YOUSEF *et al.*, 2016; BAUER *et al.*, 2013).

#### 4.6.1.4 Separação por Membranas

Tecnologia de membrana é um método de separação física onde as misturas de gases, que constituem dois ou mais componentes, são divididos por um bloqueio semipermeável (KHALILPOUR *et al.*, 2015).

Durante a separação do gás, uma mistura gasosa é colocada sob pressão no lado de alimentação da membrana. A parte da mistura que permeia a membrana é considerada permeado. A parte retida da mistura é o retentado. De um modo geral, as membranas são barreiras seletivas ao transporte de matéria entre duas fases e tem o objetivo de separar os compostos de uma mistura em função da diferença de taxa de permeação, ou seja, a passagem de uma ou várias espécies químicas presentes é limitada total ou parcialmente (SOARES, 2012; BAKONYI *et al.*, 2018).

Para enriquecer o biogás em metano, as membranas são produzidas de materiais que são permeáveis ao CO<sub>2</sub>, à água e ao amoníaco. Alguns estudos produziram variados modelos de membranas para a separação de CO<sub>2</sub>, como por exemplo, membranas de matriz mista, polímeros orgânicos microporosos, membranas de peneira molecular de carbono e membranas inorgânicas e polímeros (HE *et al.*, 2015; MONTEIRO, 2011).

#### 4.6.1.5 Remoção biológica

Para o método biológico, alguns estudos relatam que determinadas microalgas, como a *Chlorella sp.*, são capazes de remover parte significativa do CO<sub>2</sub> do biogás. O CO<sub>2</sub> é removido através da fixação biológica, usando a fotossíntese de microalgas (YANG *et al.*, 2003; ABATZOGLOU *et al.*, 2008).

O CO<sub>2</sub> presente no meio é aproveitado como fonte de carbono para multiplicação celular. Desse modo, a remoção do CO<sub>2</sub> pode ser otimizada com o uso de um biofiltro, que são reatores geralmente feitos com materiais resistentes à corrosão. Na prática, estes reatores são preenchidos com materiais porosos elevando a área superficial para fixação de microrganismos, de modo que não restrinja a passagem do biogás (SYED *et al.*, 2006).

#### 4.7 Poder calorífico do biogás

De acordo com a Norma Brasileira NBR 15213 (ABNT, 2008), o poder calorífico é a quantidade de energia liberada na forma de calor, na combustão completa de uma quantidade definida de gás com o ar, à pressão constante e com todos os produtos de combustão retornando à temperatura e pressão iniciais dos reagentes. Poder calorífico inferior é quando a água formada pela reação se encontra na forma líquida, já o poder calorífico superior é quando a água formada pela reação se encontra na forma gasosa.

O metano puro possui um valor calorífico de 9100 kcal/m<sup>3</sup> a 15,5°C e 1 atm. O poder calorífico do biogás varia entre 4800 a 6900 kcal/m<sup>3</sup>. Portanto, a concentração de metano no biogás é diretamente relacionada ao poder calorífico do biogás. O biogás, acima de 95% de purificação, possui um poder calorífico de aproximadamente 10.500 kcal/m<sup>3</sup>. O valor calórico do biogás pode ser expresso em kcal/m<sup>3</sup>, kJ/m<sup>3</sup> ou BTU/ft<sup>3</sup> (SEMAI *et al.*, 2019; IANNICELLI, 2008; U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2013).

Segundo o SGC (2012), um metro cúbico normal típico de metano tem um valor energético de cerca de 10 kWh, enquanto o dióxido de carbono tem zero. Uma composição de biogás com 60% de metano tem um conteúdo de energia de aproximadamente de 6,0 kWh por metro cúbico normal.

O biogás consegue substituir combustíveis utilizados no setor da indústria. Apresentando uma relação comparativa do metro cúbico de biogás com outros combustíveis usuais temos o correspondente a: 0,61 litros de gasolina; 0,55 litros de biodiesel; 0,45 kg de GLP; 0,654 kg de gás natural; 2,17 kg de lenha; 0,9 kg de carvão vegetal; e 1,4 kg de carvão mineral (SILVA, 2009; LIMA 2005).

#### 4.8 Aproveitamento energético do biogás

Como já citado anteriormente, os métodos de tratamento do biogás dependem da finalidade de sua aplicação. Resumidamente, a energia química do biogás pode ser aproveitada em energia térmica, elétrica e mecânica por meio de máquinas a gás e caldeiras. Após passar por um tratamento rigoroso pode, também, ser transformada diretamente como combustível ou injetado na rede. A perda de biogás, sua não utilização, ou sua simples queima, portanto, deve ser a exceção, caso não haja uma alternativa de uso mais nobre.

As principais alternativas para utilização do biogás são geração de energia elétrica, energia térmica, energia mecânica, combustível veicular e injeção na rede de gás natural, que são apresentadas a seguir:

#### 4.8.1 Geração de energia elétrica

##### 4.8.1.1 Turbinas a Gás

As turbinas a gás são máquinas térmicas que fazem a conversão de energia de um combustível em potência. Neste equipamento se aproveita diretamente a energia liberada na combustão. Os gases da combustão, que armazenam esta energia, se expandem produzindo potência mecânica no eixo de uma turbina. Geralmente, as turbinas a gás são um conjunto completo que consistem em três componentes principais: o compressor de ar, uma câmara de combustão e a turbina propriamente dita.

As turbinas a gás são acionadas pelos próprios gases quentes produzidos na combustão, o que dispensa a utilização do vapor ou outro fluido. As principais características que os combustíveis gasosos devem ter são: não formar cinzas na combustão, não conter materiais erosivos e não conter compostos corrosivos (FRANÇA JÚNIOR, 2008).

##### 4.8.1.2 Microturbinas a gás

Tal qual ocorre nas turbinas a gás, nas microturbinas o ar é aspirado e forçado para seu interior a alta velocidade e pressão, sendo, em seguida, misturado ao combustível, que é queimado na câmara de combustão. Os gases quentes resultantes da combustão são expandidos na turbina e o calor remanescente dos gases de exaustão pode ser aproveitado para aquecimento do ar de combustão (ICLEI, 2009).

Geralmente fazem parte de um sistema no qual a eletricidade é produzida através do gás misturado com ar comprimido. Essa mistura é queimada e o gás resultante da combustão é utilizado para operar turbinas (RENA *et al.*, 2019).

##### 4.8.1.3 Motores de Combustão Interna

Os motores de combustão interna são equipamentos que transformam a energia térmica de um combustível líquido ou gasoso em energia mecânica por meio do acionamento

de pistões confinados em cilindros. O aproveitamento do calor ocorre com a utilização da energia contida nos gases de exaustão. Esses motores são divididos em dois tipos de ciclos: Otto e Diesel. Para a utilização de gases como combustível, o ciclo Otto é o mais recomendável (FRANÇA JÚNIOR, 2008).

#### 4.8.2 Geração de energia térmica

##### 4.8.2.1 *Ciclo a vapor Rankine*

O calor da combustão de biogás pode ser usado para processos industriais através da queima do gás como combustível de caldeiras para geração de vapor, aquecimento direto ou geração de energia elétrica por meio do acionamento da turbina a vapor acoplada a um gerador (ICLEI, 2009).

##### 4.8.2.2 *Evaporador de chorume ou lodo de Estação de Tratamento de Esgoto*

O chorume oriundo da decomposição anaeróbia dos resíduos, bem como o lodo produzido no tratamento de esgotos, pode ter seus volumes reduzidos utilizando o biogás como combustível e evaporando a parte líquida (ICLEI, 2009).

#### 4.8.3 Produção de combustível veicular

O biogás pode ser usado como combustível veicular para carros, ônibus e caminhões, desde que passe por um processo de remoção de alguns de seus componentes para que a porcentagem de metano fique próxima ao gás natural, para ser usada para os mesmos fins. Em motores Dual-Fuel, o biogás pode ser usado em combinação com diesel como combustível veicular e manter a alta eficiência do motor diesel (SGC, 2012).

#### 4.8.4 Injeção em rede de gás natural

A produção de biometano é uma importante fonte de energia que pode ajudar a reduzir o consumo de gás natural e, portanto, as emissões de GEE. O biometano foi injetado na rede de gás natural em vários países, incluindo Suíça, Suécia, Alemanha, França e EUA. A injeção

de biogás na rede de gás natural requer tratamento prévio e purificação adequada para torná-la compatível com o gás no gasoduto (RAMIREZ; GÓMEZ, 2015).

#### **4.9 Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)**

O Protocolo de Quioto foi criado em 1997, entrando em vigor em 2005. Ele obriga os países industrializados (referidos como países do Anexo I) a manter ou diminuir as emissões de gases de efeito estufa. Para ajudar os países a cumprirem suas metas de emissão os negociadores do Protocolo incluíram três mecanismos: Comércio de emissões; Implementação conjunta; e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), proposto pelo Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. O MDL permite que projetos de redução de emissões em países em desenvolvimento recebam créditos de certificados de redução de emissão. Cada crédito equivale a 1 tonelada de CO<sub>2</sub> (RITZKOWSKII, 2018; ICLEI, 2009).

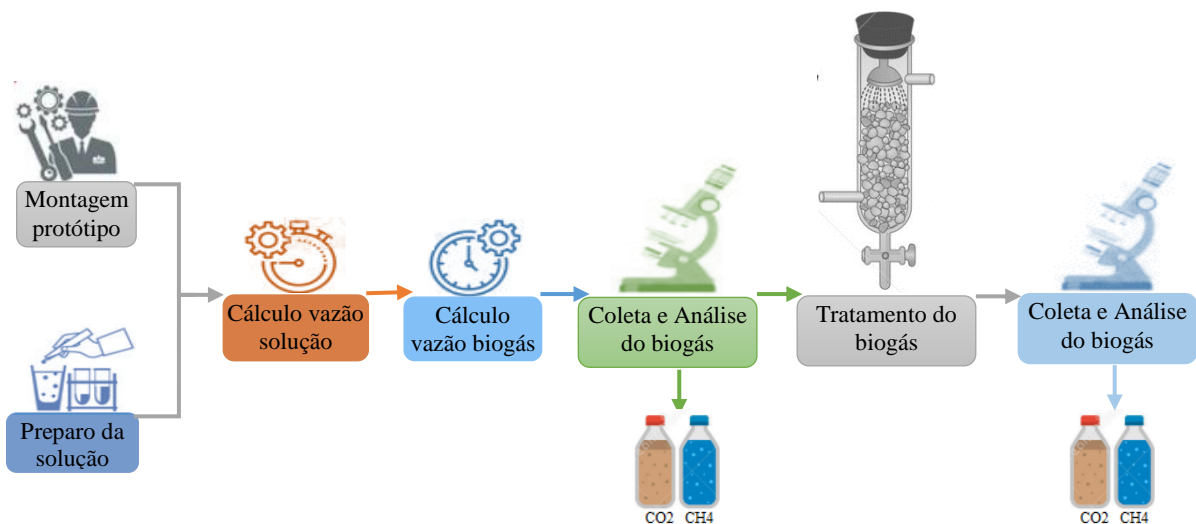
Os projetos do MDL têm, dentre diversos objetivos, a queima e o aproveitamento energético do biogás gerado nos aterros, os quais recebem certificados de redução de emissão por cada tonelada métrica de CO<sub>2</sub> não emitida, reduzida ou sequestrada. No âmbito setorial “Manuseio e descarte de resíduos” o aterro é favorável para estes projetos, visto que muitos países em desenvolvimento dependem amplamente do descarte de resíduos sólidos. Em todo mundo, o Brasil destaca-se como o terceiro com o maior número de projetos aprovados e registrados. O desenvolvimento desses projetos permitiu a criação do chamado mercado de carbono, no qual países como China, Índia e Brasil apresentam destaque (FRONDIZI, 2009; ABRELPE, 2015; RITZKOWSKII, 2018).

O MDL é o mecanismo mais aclamado nos países em desenvolvimento por levar novas tecnologias e renda. Além disso, envolve transferência de tecnologia para os países em desenvolvimento, que valoriza o meio ambiente por meio de tecnologia sofisticada (LIM; LAM, 2014).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para que os objetivos específicos fossem alcançados. Inicialmente é apresentado o local onde foi desenvolvida a pesquisa, nos itens seguintes serão apresentados os métodos, juntamente com os materiais, necessários em cada etapa. A Figura 1 ilustra o passo a passo de toda metodologia do trabalho.

**Figura 1** – Diagrama esquemático da metodologia proposta nesta pesquisa.



Fonte: Autor, 2021.

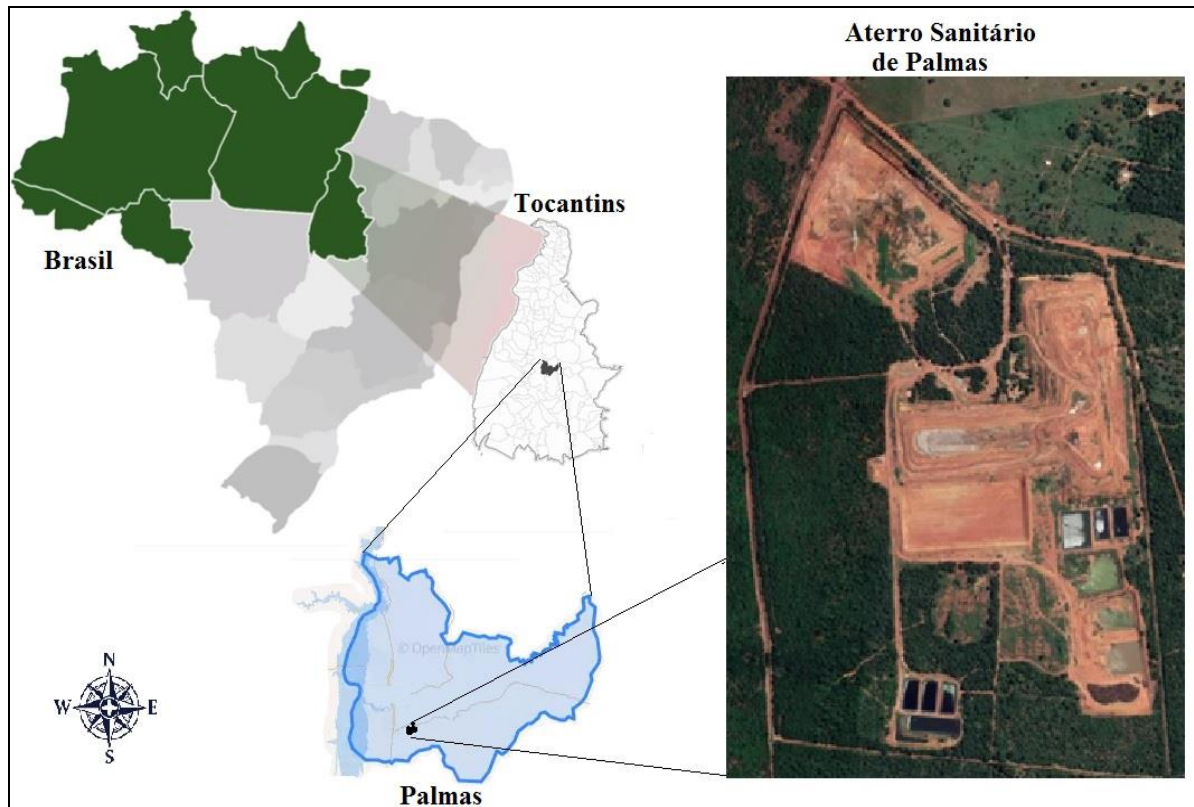
### 5.1 Localização e descrição da área da pesquisa

Para a realização desta pesquisa foi escolhido o Aterro Sanitário de Palmas/TO, tanto pela sua proximidade, localizando-se a 8,0 km da TO-050, aproximadamente a 25 km do centro de Palmas e a cerca de 6,0 km do bairro Taquaralto (Figura 2), como também pelo histórico de trabalhos já desenvolvidos no local, onde existe uma célula encerrada e preparada para a realização de pesquisas, como dissertações e artigos já publicados.

O Aterro Sanitário de Palmas/TO está em uma região com baixa densidade populacional e possui uma área de 95,7784 ha, cercada para evitar a entrada de animais e pessoas não autorizadas. Na entrada possui uma guarita (Figura 3) de controle de pessoas e do fluxo de veículos, onde são coletadas as informações quanto ao tipo de resíduos, placa,

horário de saída de veículos e pessoas, além do peso dos resíduos, que é registrado através da balança de 30 toneladas (MARQUES; AZEVEDO, 2019).

**Figura 2** – Localização do Aterro Sanitário de Palmas/TO.



Fonte: Autor (2021).

**Figura 3** – Portaria de acesso do Aterro Sanitário de Palmas/TO vista de dentro para fora.



Fonte: Autor (2021).

Toda a área de aterramento dos resíduos sólidos foi impermeabilizada com geomembrana PEAD de 2mm. Os drenos do chorume são interligados aos drenos de gases, onde o chorume é direcionado para o tratamento biológico (3 lagoas de tratamento, uma de polimento e uma vala de infiltração) e os gases são drenados por drenos verticais. A dispersão, compactação e cobertura dos resíduos nas células é realizado com o uso de trator de esteira CAT D6 (Figura 4) (MARQUES; AZEVEDO, 2019).

**Figura 4** - Disposição dos resíduos no Aterro Sanitário de Palmas/TO.



Fonte: Autor (2021).

O sistema de coleta e transporte das emissões atmosféricas instalado no Aterro Sanitário de Palmas/TO, Figura 5, é composto atualmente por 37 pontos. Marques (2019), através de sua pesquisa utilizando o software LandGEM, estimou a produção teórica de metano gerada nos anos 2021, 2030 e 2043 ser de aproximadamente 5.246.015,50 m<sup>3</sup>, 6.887.713,29 m<sup>3</sup> e 8.955.109,22 m<sup>3</sup>, respectivamente. Considerando uma eficiência de coleta de 75%, o autor conseguiu valores da vazão do biogás para o Aterro Sanitário de Palmas/TO de 450,69 m<sup>3</sup>/h no ano de 2021, 589,70 m<sup>3</sup>/h no ano de 2030 e 766,70 no ano de 2043.

Azevedo (2021), em sua pesquisa no Aterro Sanitário de Palmas/TO, a respeito da equivalência energética gerada pelo empreendimento, concluiu que é possível gerar 432 MW de energia elétrica mensais com a produção atual de biogás gerado pelo aterro.

**Figura 5** – Pontos de emissão de biogás no Aterro Sanitário de Palmas/TO.



Fonte: Autor (2021).

## 5.2 Medição de fluxo

Para realizar as medições do biogás foi utilizado um dreno vertical, de uma célula já encerrada, preparado para coleta, o qual foi preciso fazer um procedimento adaptativo (Figura 6), onde fizeram um isolamento concretado, com um orifício central apropriado para realização de experimentos.

**Figura 6** - Estação experimental de biogás do Aterro Sanitário de Palmas/TO.



Fonte: Autor (2021).

A medição de vazão do biogás foi realizada através de um medidor de gás GLP (Figura 7), da marca LAO, modelo G0,6, vazão máxima  $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$  e vazão mínima  $0,016 \text{ m}^3/\text{h}$ , interligado através de conexão de cobre maleável de  $3/8''$ .

**Figura 7** - Medidor de gás GLP.



Fonte: Autor (2021).

### **5.3 Coleta e análise da amostra de biogás**

A Figura 8 apresenta o kit o qual foi realizada a coleta e análise do biogás. É composto por um saco plástico tipo BAG, seringa plástica coletora e reagentes. A análise dos gases aconteceu antes e depois do tratamento. Logo após a coleta, foi usado um kit, desenvolvido pela empresa Alfakiti em parceria com a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) contendo instrumentos para a leitura (Figura 9) da concentração do gás  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ .

O Kit permite analisar de forma simples e rápida a composição dos gases do biogás. Para análise de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ , o biogás é borbulhado em uma solução onde a concentração é dada pela diferença entre o volume de gás inicial e final.

**Figura 8** - Kit análise de biogás.



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

**Figura 9** – Leitura e análise do tratamento de biogás.



Fonte: Autor (2021).

#### 5.4 Sistema de purificação do biogás

Nessa etapa da pesquisa foi realizada a purificação do biogás através de coluna de lavagem com solução alcalina de forma a reduzir o teor de CO<sub>2</sub>, seguindo um modelo de coluna de absorção, utilizando soluções de hidróxido cálcio com concentrações de 0,1, 0,15 e 0,2 mol/L (Figura 10), sendo avaliada a eficiência do sistema.

A Figura 11 foi o protótipo proposto para realização da purificação do biogás. Foi construída uma coluna de absorção, ou seja, um cilindro vertical com 1000 milímetros de altura e 100 milímetros de diâmetro. O material escolhido é o PVC, pois possui um custo mais acessível para realizar o experimento. O tubo tem espessura de parede de 2 milímetros e o fechamento das extremidades é feito através de um tampão de PVC de 100 milímetros, com um orifício central de ½ polegada para saída do efluente (inferior, solução absorvente, e superior, gás tratado). Nas laterais possuem 2 orifícios opostos, de ½ polegada, um a 200 milímetros da base para entrada do biogás e o outro a 250 milímetros da base para entrada da solução absorvente. Em seu interior, foi instalado um tubo de PVC de 460 milímetros, com dezenas de furos, com diâmetro de 3,5 milímetros.

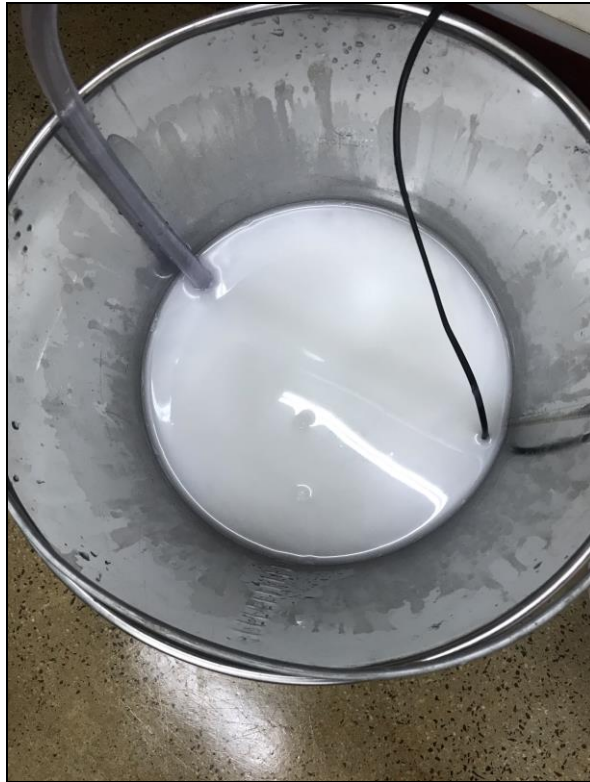
O funcionamento do purificador é fazer o biogás entrar por baixo e a solução absorvente, em contra fluxo, por cima. O biogás sofrerá resistência ao passar sob a coluna da solução absorvente, em contra fluxo. O intuito é fazer com que haja maior área de contato possível entre líquido e o biogás para absorver uma maior concentração de CO<sub>2</sub>.

No topo do filtro foi instalada a tubulação de saída do biogás tratado, após contato com a solução absorvente, o qual foi realizado 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 saída de biogás e da solução foram utilizadas adaptadores para caixas d'água de ½ polegada, pois são de baixo custo e possui boa vedação.

A construção do filtro teve como objetivo a vedação completa entre os componentes, utilizando silicone e anéis de vedação onde necessário para impedir vazamentos.

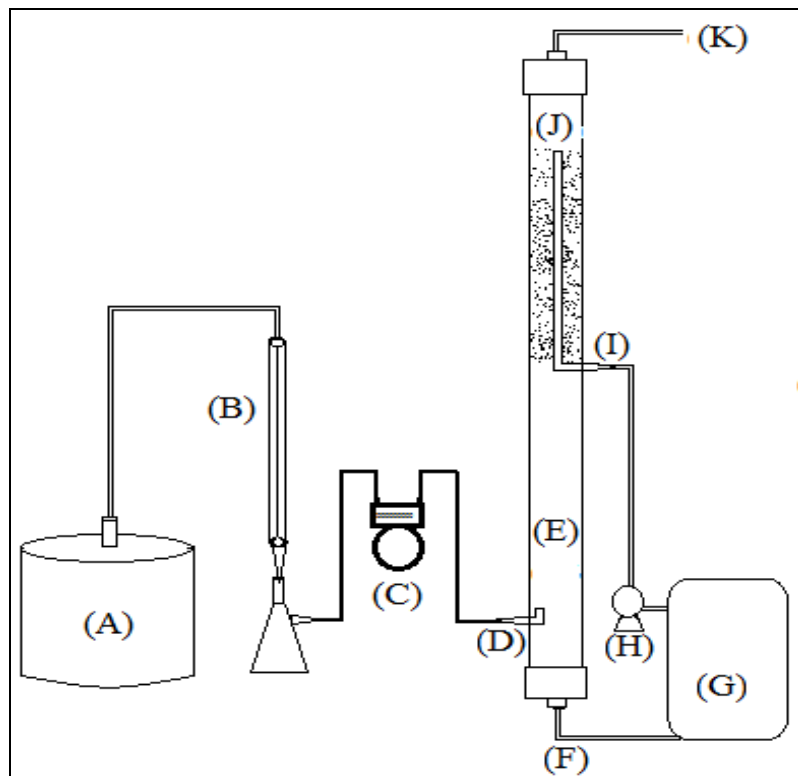
Para a circulação da solução absorvente, água destilada com hidróxido de cálcio, foi utilizado uma bomba submersa, marca Salo Better, modelo SB1000C, com vazão de 400 a 1000L/h, uma mangueira de PVC e, dentro do filtro, um tubo de PVC de ½ polegada furado para esguicho da solução.

**Figura 10:** Solução absorvente.



Fonte: Autor (2021).

**Figura 11:** Esquema do sistema de purificação de biogás.



Fonte: Autor (2021).

Onde:

- (A)– Dreno vertical do biogás do Aterro Sanitário
- (B)– Condensador
- (C)– Medidor de gás GLP
- (D)– Entrada do biogás no sistema
- (E)– Torre de pulverização
- (F) – Saída de retorno da solução
- (G)– Recipiente contendo a solução absorvedora
- (H)– Bomba
- (I) – Entrada da solução absorvedora
- (J) – Chuveiro
- (K)– Saída do biogás tratado

## 5.5 Testes iniciais

Foram realizados testes com lavador de gás com modificação da concentração da solução alcalina de 0,12 mol/L até 0,22 mol/L, seguindo recomendações de Srichat *et al.* (2017), mantendo constante a vazão da solução de 444,5 L/h.

## 5.6 Planejamento Experimental

Foi realizado um planejamento experimental nessa pesquisa no intuito de verificar os efeitos de duas variáveis (vazão da solução absorvente e concentração da solução absorvente) no processo de purificação de biogás (Figura 12), 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.

**Figura 12:** Protótipo do purificador de biogás.



Fonte: Autor (2021).

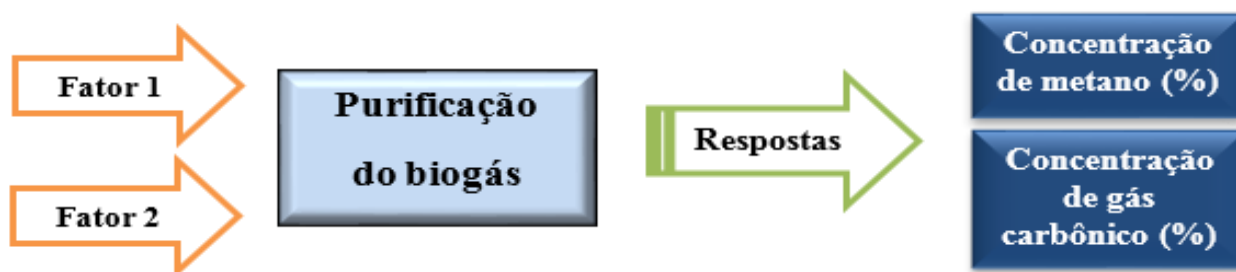
Onde:

- (1) – Dreno vertical do biogás do Aterro Sanitário
- (2) – Adaptador para saída do biogás
- (3) – Condensador
- (4) – Medidor de gás GLP
- (5) – Torre de pulverização
- (6) – Solução absorvedora

#### 5.6.1 Delineamento de Faces Centradas (DFC)

Foi verificado através de planejamento multivariável o efeito de dois fatores no sistema de purificação de biogás em estudo (Figura 13). Foi aplicado um planejamento Delineamento de Faces Centradas (DFC), sem repetições, com 11 tipos de combinações entre os fatores. Os valores mínimos e máximos são apresentados na Tabela 1 enquanto que a ordem dos experimentos são demonstrados na Tabela 2.

**Figura 13** – Representação do planejamento experimental utilizado no processo de purificação do biogás proveniente do Aterro Sanitário de Palmas/TO (Delineamento de Faces Centradas (DFC)).



Fonte: Autor (2021).

Onde:

Fator 1 – vazão da solução absorvente (L/h).

Fator 2 – concentração da solução absorvente (mol/L).

**Tabela 1** – Níveis dos Fatores empregados no Planejamento Experimental, durante o tratamento de biogás.

Fatores	Níveis		
	(-1)	(0)	(+1)
Vazão da solução absorvente (L/h)	281	444,5	608
Concentração da solução absorvente (mol/L)	0,10	0,15	0,20

Fonte: Autor (2021).

Os experimentos serão realizados de forma aleatória, com três repetições, conforme Tabela 2.

**Tabela 2** – 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 (2021).

### 5.7 Determinação do poder calorífico do biogás

O Poder Calorífico Superior dos gases de aterro sanitário foi calculado através da ISO 6976:1995. Esta Norma Internacional especifica métodos para o cálculo do valor calorífico superior e inferior, densidade, densidade relativa e índice de Wobbe de gases naturais, substitutos do gás natural e outros combustíveis gasosos.

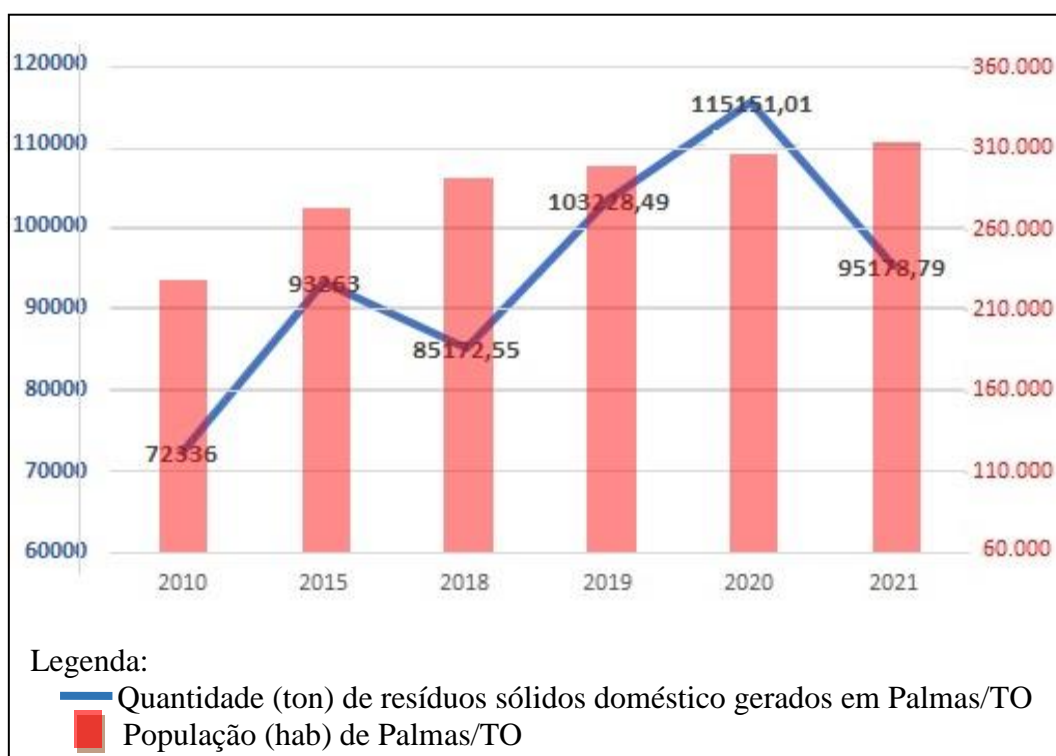
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Geração de Resíduos sólidos em Palmas/TO

Analisando a geração de resíduos sólidos em Palmas, observada no Gráfico 1, pegando como base de referência os anos 2010, 2015, 2018, 2019, 2020 e 2021, segundo dados da Secretaria de Infraestrutura e Serviços Públicos de Palmas, percebe-se que em dez anos houve um aumento de 59%. No ano de 2020 estávamos num momento pandêmico, *lockdown*, fato que contribuiu para um aumento, de 7,55%, nos primeiros meses do ano, principalmente janeiro. Algumas possíveis razões para isso foram a mudança de hábitos e as novas dinâmicas sociais que passaram a ser residências. Sendo assim, os descartes dos resíduos aconteceram nas residências, já que o consumo em restaurantes foi substituído pelo delivery.

Segundo dados da Ambrelpe, sobre Panorama de Resíduos Sólidos do Brasil do ano 2021, a geração média per capita de resíduos sólidos no cenário nacional foi de 1.067 kg/hab.dia, na região norte 0,898 kg/hab.dia, enquanto que em Palmas/TO foi de 1,236 kg/hab.dia.

**Gráfico 1** –Geração de Resíduos Sólidos Anual e População de Palmas/TO



Fontes: Secretaria de Infraestrutura e Serviços Públicos de Palmas/TO (2022).

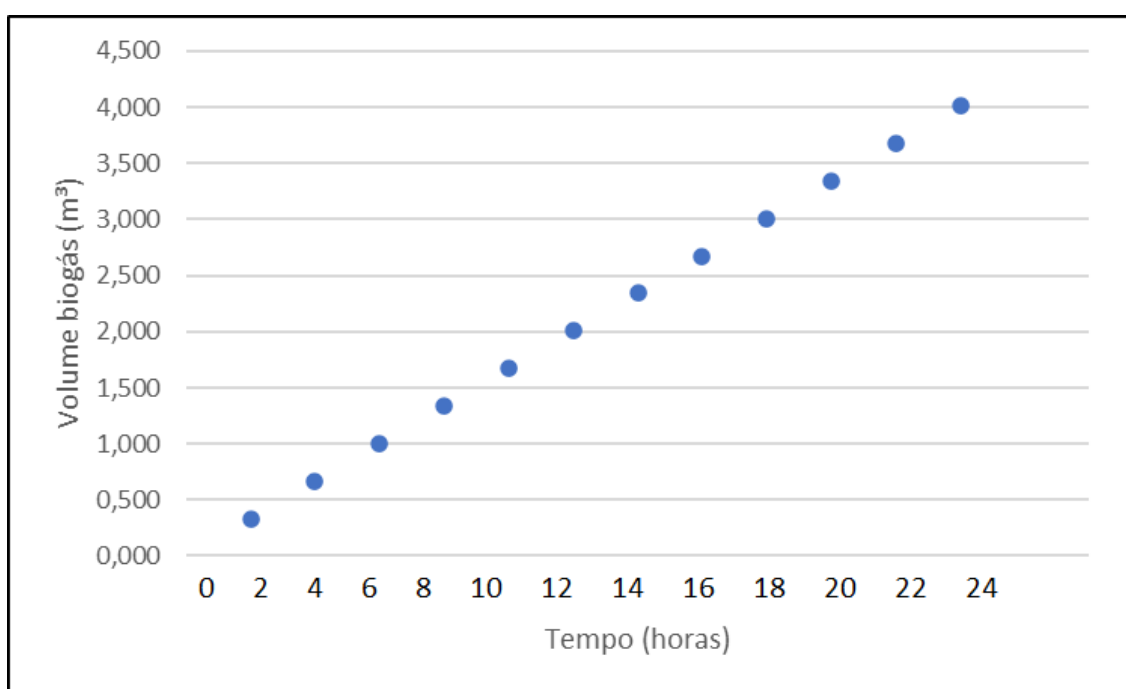
Conforme recomendações da Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2020) para a gestão de resíduos sólidos durante a pandemia de coronavírus, os resíduos sólidos domiciliares seriam passivos de acréscimo de 15 a 25%. Esse dado fica bem próximo da realidade ocorrida em Palmas, que no ano de 2020 teve um acréscimo de 11,5% na produção de resíduos sólidos quando comparado ao ano anterior.

Na cidade de Araraquara/SP, segundo Ventura *et al.*, 2021, a taxa de geração de resíduos sólidos reduziu durante o primeiro semestre de 2020, em média, 8%. A geração *per capita* esperada era de 0,75 kg/ha.d, porém nesse período foi de 0,69 kg/hab.d. A cidade de Palmas, nesse mesmo período, obteve um aumento na geração *per capita* de 32%. Como já citado, um dos motivos que levou a isso é a mudança de costumes onde mudaram o consumo, que antes era em restaurantes e passou a ser por delivery.

## 6.2 Medição de vazão

O Gráfico 2 apresenta o acumulado da vazão de biogás do Aterro Sanitário de Palmas/TO, entre as 07:00 da manhã do dia 23 às 07:00 da manhã do dia 24 de julho de 2021. O dreno de captação pertence a uma célula, de deposição de 5 anos, fechada aproximadamente no final de 2020. O volume diário de biogás acumulado foi de 4,025 m<sup>3</sup>.

**Gráfico 2** – Acumulado de vazão do biogás ao longo do dia (m<sup>3</sup>)



Fonte: Autor (2021).

Conforme Marques (2019), o Aterro Sanitário de Palmas/TO tem instalado cerca de 37 coletores de biogás prontos para serem acoplados no sistema de captação de gases. Ainda em seus estudos, Marques (2019) calculou, através do software LandGEM, a geração de metano desde o ano 2001, ano de início das atividades do aterro, até um horizonte de 25 anos, data de encerramento das atividades do aterro. O valor de metano gerado no ano de 2022, ano atual, será de 5.264.015,50m<sup>3</sup>, o qual está sendo gerado 622,13m<sup>3</sup>/h. No ano de encerramento, 2043, estará gerando 8.955.109,22m<sup>3</sup> de metano, 1.022,27m<sup>3</sup>/h. Já no acumulado desde 2018, ano de início dos cálculos, até 2043 será de 179.933.953,37m<sup>3</sup> de metano. Segundo Marques (2019), com a produção atual de metano gerado é possível abastecer cerca de 3.251 residências, com o consumo médio mensal de energia elétrica de 132,872 kWh.

### 6.3 Testes iniciais

Os dados experimentais obtidos nos testes iniciais da purificação de biogás proveniente do Aterro Sanitário de Palmas/TO são apresentados na Tabela 3. Foi aplicado o Teste-t simulando variâncias equivalentes no tratamento estudado, com o objetivo de se verificar a existência ou não de diferença entre eles (Tabela 4). 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 %. Esse teor de metano em amostra proveniente de aterros sanitários já foi reportado por outros pesquisadores (Ryckebosch *et al.* 2011).

**Tabela 3** – Dados obtidos nos testes iniciais de purificação de biogás do Aterro Sanitário de Palmas/TO

Experimentos	Concentração de solução absorvente (mol/L)	
	0,08	0,16
1	68	65
2	70	75
3	65	85
<b>Média</b>	67,7	75
<b>Desvio Padrão</b>	2,51	10
<b>Graus de Liberdade</b>	2	2

Fonte: Autor (2022).

**Tabela 4** – Análise estatística através do Teste-t simulando variâncias equivalentes nos testes de purificação de biogás.

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

Fonte: Autor (2021).

Os dados observados nas Tabelas 3 e 4 informam que não existem diferença significativa de médias nos dois tratamentos empregados (concentração de solução absorvente iguais a 0,08 e 0,16 mol/L), no nível de 95 % de confiança. Em termos de remoção de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) do biogás, recomenda-se a operação do lavador de gases com uma concentração de solução absorvente igual a 0,08 mol/L, uma vez que o líquido de lavagem pode conter uma quantidade menor de hidróxido de cálcio e promovendo assim uma maior economia durante a operação do sistema.

Srichat *et al.*, (2017), estudaram a purificação de biogás proveniente de biodigestor em granjas de frango através de lavadores de pulverização. A vazão de biogás utilizada no tratamento incluiu 3 níveis: 5, 10 e 15 L/min, enquanto a solução das vazões, utilizadas para o tratamento do biogás, foram de 10, 20 e 30 L/min. O tempo utilizado para o experimento foi de 30 minutos por solução por vazão. Os testes com solução de hidróxido de cálcio com concentração de 0,1 e 0,2 mol/L, resultaram no maior valor de metano de 81,1% e 89,3% quando a vazão de biogás foi de 5 L/min e a vazão da solução foi de 30 L/min. A partir do estudo, foi constatado que os seguintes fatores afetaram a mudança na quantidade de dióxido de carbono por absorção de líquido: 1) tipo de solução, 2) concentração da solução, 3) vazão do biogás e 4) vazão da solução utilizada no tratamento químico. As quantidades de produtos

químicos, dissolvidos na água, podem afetar a absorção de dióxido de carbono. O maior contato do líquido com o gás, favorece o processo de difusão do gás no líquido e conseqüentemente uma maior remoção do componente indesejado na mistura.

O valor obtido para o enriquecimento do CH<sub>4</sub> desta presente pesquisa foi de 75%, estando inferior ao resultado, de 89,3%, obtido por Srichat *et al* (2017). Essa diferença pode estar associada com a vazão da solução absorvente empregada no processo, 7,4 L/min da presente pesquisa e 30 L/min pela pesquisa realizada por Srichat *et al* (2017).

Lasocki *et al.*, (2015), realizaram a construção de um sistema de purificação de biogás visando a remoção de H<sub>2</sub>S e CO<sub>2</sub>, constituído de um vaso reacional de 1 L contendo 500 mL de solução absorvente, sendo empregadas os seguintes reagentes nos testes de absorção: hidróxido de sódio (NaOH), etilenoglicol (EG), etanolamina (EA), dietanolamina (DEA) e água destilada (H<sub>2</sub>O). Nos testes de absorção, tratando o biogás com solução de NaOH 1M e 100% EA resultou na remoção completa de H<sub>2</sub>S e CO<sub>2</sub>. Segundo os pesquisadores, o principal problema desse tipo de sistema é a manutenção de uma alta e estável taxa de absorção dos reagentes empregados nos testes, uma vez que não ocorre a renovação dos mesmos durante a operação do sistema. O processo, na maioria das vezes, apresenta remoção máxima de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S nas primeiras horas de operação, sendo então observada o decaimento da remoção dos constituintes indesejáveis do biogás ao longo do tempo.

O sistema proposto na presente pesquisa tem a facilidade da realização da substituição da solução absorvente sem a interrupção do processo de lavagem, evitando assim os problemas elencados por Lasocki *et al.*, (2015).

Freddo (2017) avaliou a eficiência de remoção de CO<sub>2</sub> e de H<sub>2</sub>S com diferentes soluções absorvedoras e as comparou em um estudo de viabilidade técnica para cenários específicos. As soluções absorvedoras utilizadas foram: água ultrapura, gás ozônio (O<sub>3</sub>) solubilizado em água, solução com hidróxido de sódio (NaOH), solução com hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) e solução contendo ferro complexado com ácido etilendiaminotetraacético (Fe/EDTA). Todos esses testes foram realizados em condições de temperatura e pressão ambientes. Para os ensaios em batelada com as soluções de água ultrapura, gás ozônio solubilizado em água, solução de NaOH (0,5 mol.L<sup>-1</sup>), solução de Ca(OH)<sub>2</sub> (0,250 mol.L<sup>-1</sup>) e solução de Fe/EDTA foi utilizado um biogás proveniente de um biodigestor de uma agroindústria. Os resultados indicaram que a solução contendo o gás ozônio solubilizado não apresentou efeito significativo para o tratamento de biogás quando comparado com a água ultrapura. Quando comparadas as soluções alcalinas, a solução com NaOH apresentou alta eficiência na remoção, em média, de CO<sub>2</sub> (83,98%) e H<sub>2</sub>S (100%) do biogás, sendo que a

solução de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , indicou menor eficiência na remoção de  $\text{CO}_2$  (30,1%) com remoção de 100% de  $\text{H}_2\text{S}$ . O valor da eficiência de remoção de biogás (50 %) dessa presente pesquisa foi bem superior ao obtido por Freddo (2017), e isso pode estar relacionado com o tipo de sistema empregado. O sistema empregado nessa pesquisa favorece o processo de absorção de  $\text{CO}_2$  através da formação de spray com a solução alcalina e conseqüentemente uma maior velocidade de reação química entre o gás carbônico e o hidróxido de cálcio em solução.

#### 6.4 Planejamento experimental

Os resultados obtidos do Delineamento Composto Central (DCC  $2^2$  com ponto central) proposto nesse trabalho podem ser observados na Tabela 5. Para esse planejamento experimental, foi analisada a influência de dois fatores no tratamento de biogás, sendo eles: vazão de solução (L/h) e concentração de absorvente (mol/L).

**Tabela 5** – Resultados do Planejamento  $2^2$  com ponto central obtido para a concentração de metano após o tratamento do biogás.

Ensaio	Fatores		CM (%)
	VS (L/h)	CA (mol/L)	
1	281	0,10	71
2	608	0,10	66
3	281	0,20	86
4	608	0,20	86
5	444,50	0,15	77
6	444,50	0,15	75
7	444,50	0,15	75

Onde: VS: vazão da solução, CA: concentração do absorvente, CM: concentração de metano.

Fonte: Autor (2022).

A partir da análise dos dados apresentados na Tabela 5, pode-se verificar que a maior concentração de metano foi obtida nos ensaios “3” e “4”, ambos com 86% de concentração de metano na saída do sistema. Esse percentual foi obtido com o emprego de uma concentração de absorvente de 0,20 mol/L, independente da vazão média da solução medida no instante indicado.

Já a menor concentração de metano foi encontrada nas condições onde a concentração do absorvente eram as mínimas (0,10 mol/L), indicando um favorecimento na obtenção de maiores percentuais de metano ao se utilizar de uma solução do absorvente mais concentrada.

Com base nos dados obtidos experimentalmente, empregou-se a análise estatística através do software PROTIMIZA Experimental, de maneira a obter um modelo matemático ajustado dos experimentos realizados. Na Tabela 6 pode-se observar os dados referente aos coeficientes de regressão obtidos para geração do modelo.

**Tabela 6** – Coeficientes de regressão do Planejamento 2<sup>2</sup> com pontos centrais em um intervalo com 95% de confiança.

Fatores	Coefficientes de regressão	Erro Padrão	t <sub>calc</sub> *	p-valor**
Média	76,57	0,58	132,97	0,0000
X <sub>1</sub>	-1,25	0,76	-1,64	0,1994
X <sub>2</sub>	8,75	0,76	11,49	0,0014
X <sub>1</sub> .X <sub>2</sub>	1,25	0,76	1,64	0,1994

\*t<sub>calc</sub>: magnitude da influência no processo.

\*\*p: probabilidade de significância do teste t.

Fonte: Autor (2022).

O modelo matemático que relaciona a concentração de metano na saída do sistema com a vazão da solução e a concentração do absorvente foi obtido empregando os coeficientes de regressão encontrados conforme apresentado na Eq. 1. No intervalo que compreende as condições utilizadas para as análises experimentais, o modelo retorna uma resposta com 95% de confiança.

$$\% \text{ metano} = 76,57 - 1,25X_1 + 8,75X_2 + 1,25X_1 \cdot X_2 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: X<sub>1</sub> = vazão da solução; X<sub>2</sub> = concentração do absorvente.

Com finalidade de verificar a qualidade do ajuste do modelo matemático obtido foi realizado uma Análise de Variância (ANOVA) conforme disposto na Tabela 7.

**Tabela 7** - ANOVA para purificação de biogás de Aterro Sanitário visando elevação da concentração de metano na saída do sistema.

<b>Fonte de Variação</b>	<b>Soma dos Quadrados</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>F<sub>calc</sub></b>	<b>p-valor</b>
Regressão	318,8	3	106,3	45,8	0,00527
Resíduos	7,0	3	2,3		
Falta de ajuste	4,3	1	4,3	3,2	0,21445
Erro Puro	2,7	2	1,3		
Total	325,7	6			

$$R^2 = 97,86\%; F_{\text{tab}} = F_{3;3;0,05} = 9,28$$

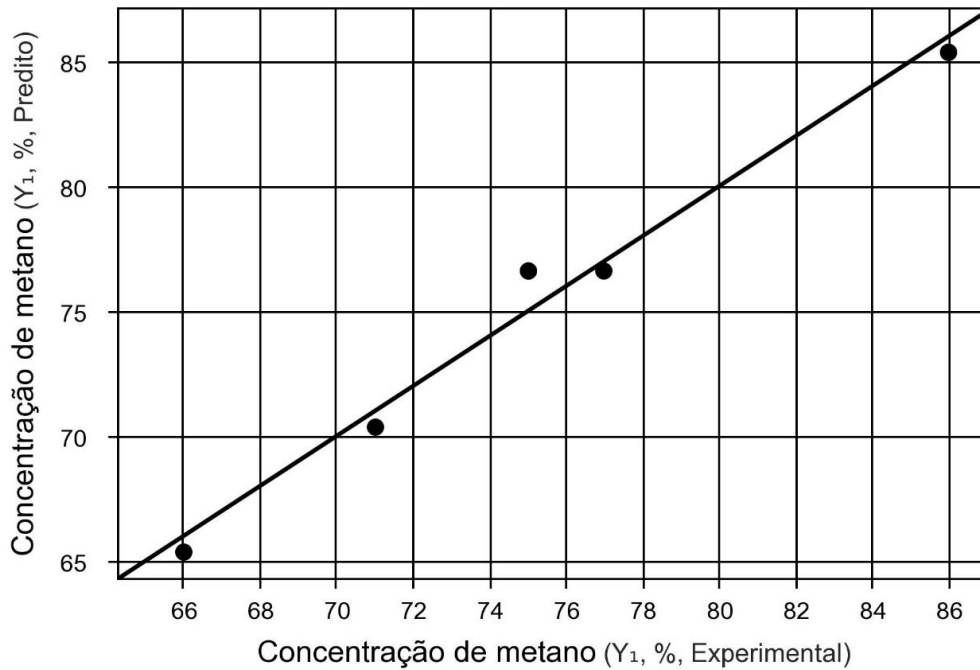
Fonte: Autor (2022).

Através do Teste-F, podemos analisar a significância estatística para os dados obtidos. O teste consiste na comparação entre os valores de  $F_{\text{calculado}}$  (45,8) e  $F_{\text{tabelado}}$  (9,28). De acordo com Rodrigues e Lemma (2014), se o valor de  $F_{\text{calculado}}$  for maior que o valor de  $F_{\text{tabelado}}$ , então o ajuste é significativo, estatisticamente.

Outra maneira de se verificar a qualidade do ajuste do modelo é pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ). De acordo com Novaes et al., (2017) o valor de  $R^2$  varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 melhor será o ajuste do modelo. Nesse trabalho o valor para esse coeficiente foi de 0,9786.

Na Figura 14 é apresentado os valores preditos pelo modelo matemático obtido versus os valores obtidos experimentalmente nos ensaios de campo.

**Figura 14** – Valores Experimentais versus Valores Preditos, para a Concentração de Metano.



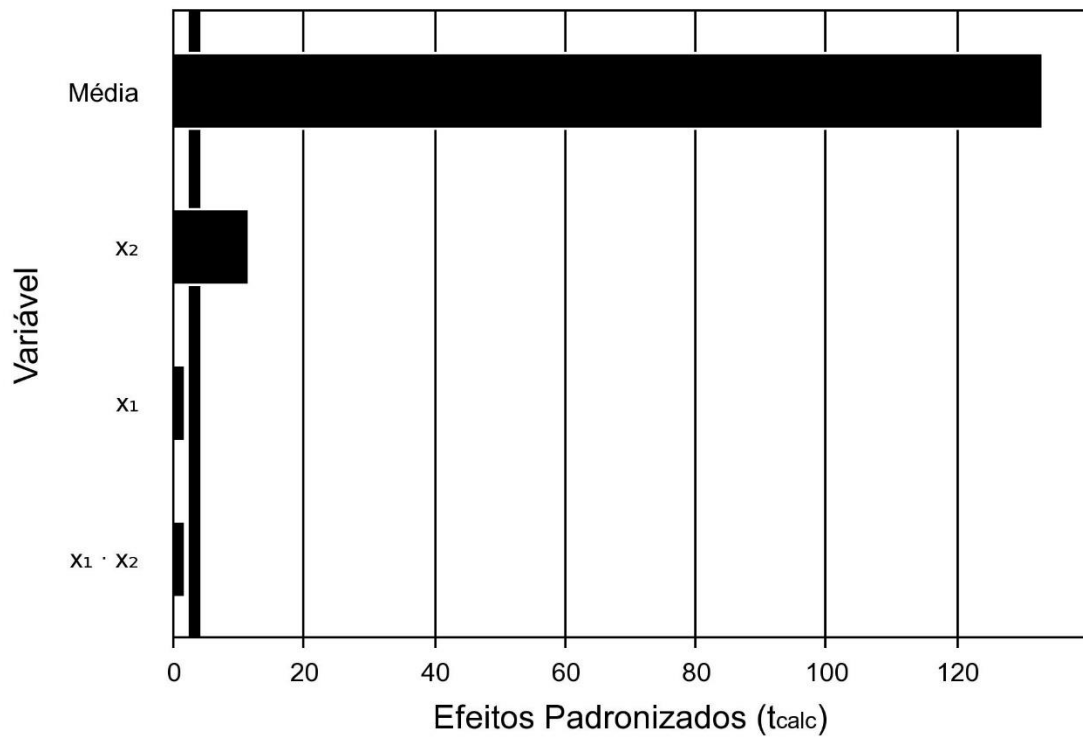
Fonte: Autor (2022).

Ao analisar a distribuição dos resíduos na Figura 14 pode se reafirmar que o modelo obtido apresenta uma boa qualidade, considerando que os valores experimentais estão próximos da reta obtida e que não foi obtido nenhum valor com um alto grau de dispersão.

O Diagrama de Pareto disposto na Figura 15 foi obtido através do software PROTIMIZA Experimental, com o objetivo de verificar a influência dos fatores: vazão de solução ( $X_1$ ) e concentração do absorvente ( $X_2$ ), bem como também a interação entre esses fatores.

O efeito de cada fator é apresentado na Figura 15 em forma de barras, já a linha lateral esquerda indica o valor mínimo para que um fator tenha efeito significativo na análise estatística. Nesse trabalho, o nível de significância foi definido como  $\alpha=5\%$  ( $p=0,05$ ).

**Figura 15** – Representação do Diagrama de Pareto

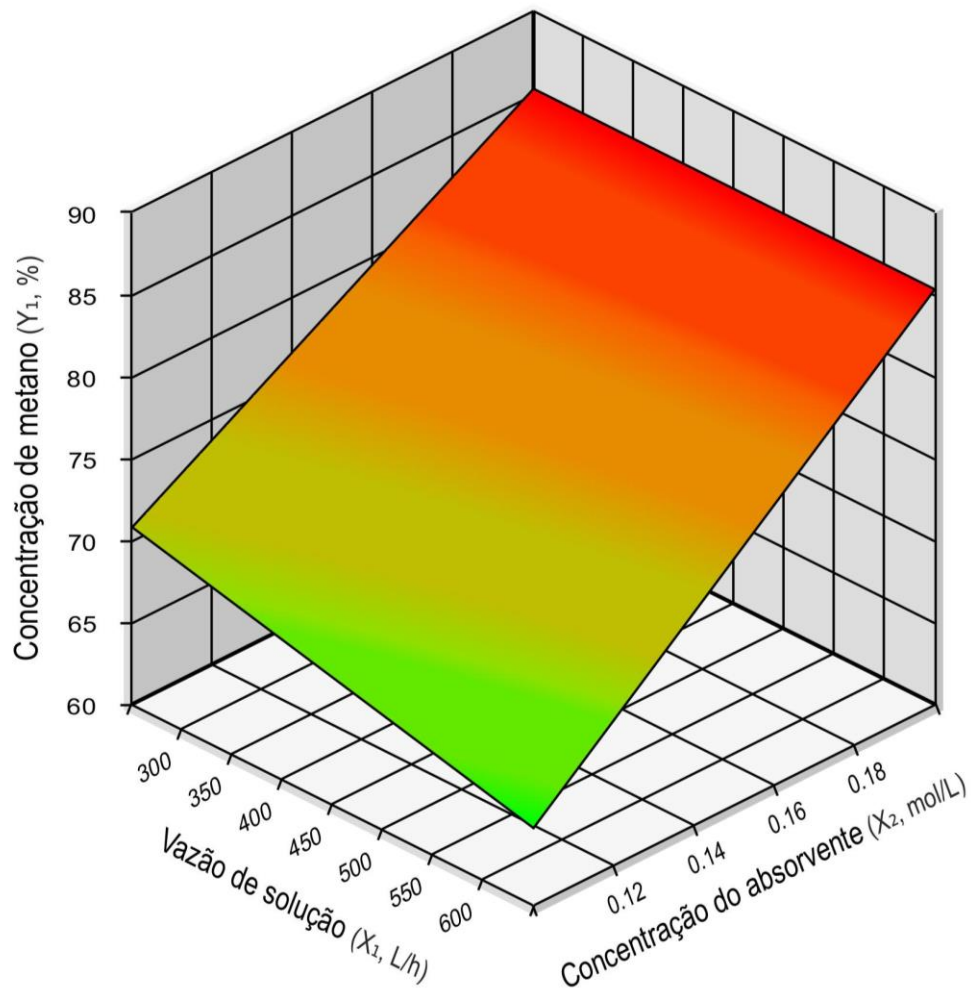


Fonte: Autor (2022).

A partir do Diagrama de Pareto obtido nesse trabalho é possível afirmar que a concentração do absorvente ( $t_{calc} = 11,49$ ) foi a única variável que apresentou efeito significativo na análise experimental, tendo em vista que seu valor superou o valor de  $p=0,05$  com um nível de confiança de 95 %.

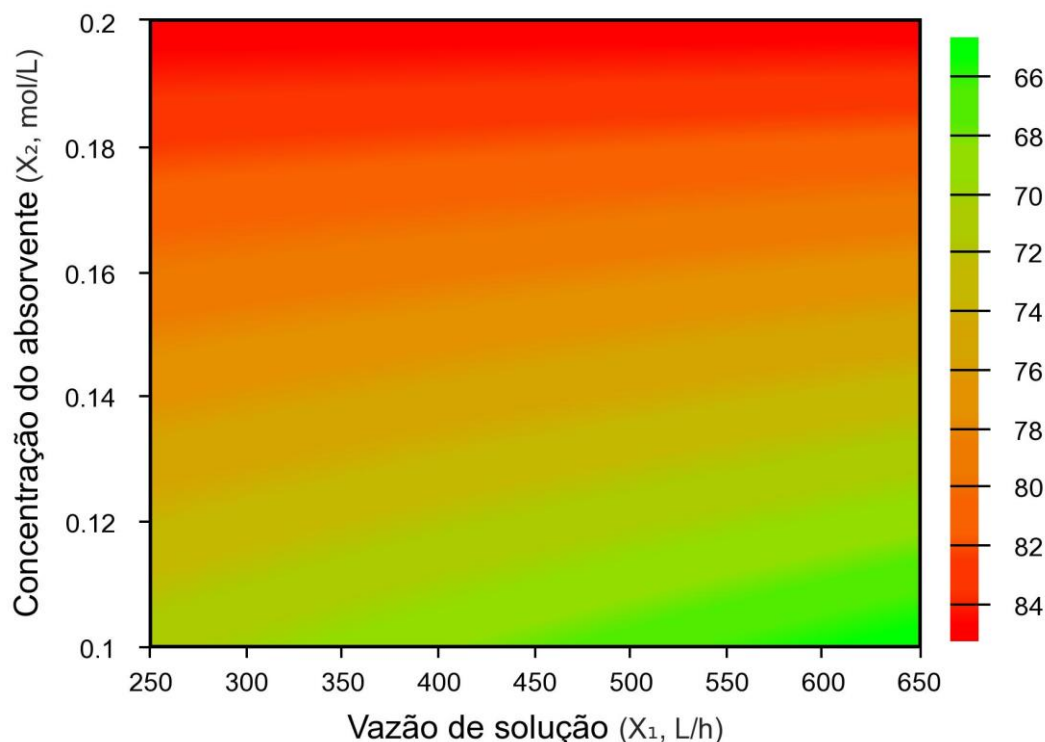
Além disso, pode-se dizer que a concentração do absorvente tem efeito positivo na resposta da concentração de metano do sistema, ou seja, quanto maior a concentração do absorvente empregado, maior será a concentração de metano na saída do sistema.

Já nas Figuras 16 e 17 podemos observar a superfície de resposta e a curva de contorno do presente trabalho, respectivamente. A superfície de resposta compreende na descrição gráfica do modelo matemático obtido, enquanto a curva de contorno é a projeção dos cortes da superfície sobre o plano dos fatores analisados.

**Figura 16** – Superfície de Resposta

Fonte: Autor (2022).

Através da superfície de resposta obtida, podemos observar graficamente a interação que os dois fatores empregados provocam na variável de saída (concentração de metano). Por meio do gradiente de cores apresentados, nota-se a pouca influência que a vazão da solução tem na concentração final de metano do sistema. Por outro lado, é possível verificar que a concentração do absorvente é fator determinante para obtenção de altos teores de metano.

**Figura 17 – Curva de Contorno**

Fonte: Autor (2022).

Ao analisar a curva de contorno para o modelo obtido, é possível constatar que o único fator que tem significativa influência direta com a concentração de metano é a concentração de absorvente, confirmando o que foi explicitado anteriormente pelo diagrama de Pareto e pela superfície de resposta.

Angheben (2017) analisou a influência de dois fatores no processo de remoção de  $H_2S$  no biogás: concentração do absorvente Fe/EDTA (a) e a razão entre vazão de solução e vazão do biogás (b). Através do planejamento estatístico realizado pelo pesquisador, foi constatado que a variável que relaciona as vazões não possuía influência estatística na remoção de  $H_2S$ . Por outro lado, a concentração do absorvente mostrou influência relevante.

Seguindo o mesmo princípio, Maia *et al.* (2015) realizaram um planejamento experimental relacionando a concentração do absorvente Fe/EDTA (a) e a razão entre vazão de solução e vazão do biogás (b). Entretanto, os pesquisadores avaliaram a remoção tanto de  $H_2S$  quanto do  $CO_2$ . De acordo com os resultados, ambos os fatores possuíam influência significativa na remoção de gás carbônico e sulfeto de hidrogênio.

## 6.5 Avaliação do poder calorífico

Mediante os resultados pós processo de purificação do biogás, a Tabela 8 demonstra o poder calorífico metano alcançado.

**Tabela 8**– Resultados do Planejamento Composto Central (DCC) obtido para o poder calorífico do biogás após processo de purificação.

Ensaio	Fatores		Poder Calorífico (kJ/m <sup>3</sup> )
	VS (L/h)	CA (mol/L)	
1	281	0,10	25120
2	608	0,10	23027
3	281	0,20	31401
4	608	0,20	31401
5	444,50	0,15	27632
6	444,50	0,15	27214
7	444,50	0,15	27214

Onde: VS: vazão da solução; CA: concentração do absorvente.

Fonte: Autor (2022).

O poder calorífico do biogás é, em média, 21,5 MJ/m<sup>3</sup> enquanto o do gás natural é de 35,8 MJ/m<sup>3</sup>. O CO<sub>2</sub> do biogás diminui seu poder calorífico. Então a remoção do CO<sub>2</sub> do biogás gera um aumento no poder calorífico. Além do CO<sub>2</sub>, o biogás contém pequenas quantidades de sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S). Quando a água está presente no biogás, o H<sub>2</sub>S forma ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), tornando o biogás inutilizável, pois é altamente corrosivo. Atualmente, o biogás que foi retirado o H<sub>2</sub>S é usado principalmente para produzir eletricidade, com turbinas a gás. No entanto, nesse processo, a maior parte da energia é perdida como calor, o que resulta em uma baixa eficiência geral. A remoção de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S do biogás é o chamado de enriquecimento de metano do biogás. Ao atualizar o biogás para a qualidade do gás natural, contendo mais de 90% de CH<sub>4</sub>, ele é adequado para aplicações mais avançadas nas quais o calor não é desperdiçado, resultando em maior eficiência (AL MAMUN e TORII, 2017).

Ainda, conforme Al Mamun e Torii (2017), o processo de enriquecimento do biogás gera novas possibilidades para seu uso, como substituir o gás natural e ser aplicável para uso nos veículos. No entanto, a purificação aumenta os custos da produção de metano. Portanto, é

importante ter um processo de enriquecimento otimizado em termos de baixo consumo de energia e alta eficiência, proporcionando alto teor de metano no gás enriquecido.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 Conclusões

Este trabalho foi realizado para desenvolver um sistema de baixo custo, usando lavador de torre de pulverização, que possa ser usado para purificar o biogás do Aterro Sanitário de Palmas/TO aproveitando o seu poder energético.

O perfil diário de vazão de biogás de 18 m<sup>3</sup> indica uma possibilidade de aplicação desse biocombustível como recurso energético.

Antes e depois dos tratamentos, os valores dos componentes CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> do biogás foram determinados para se estimar a eficiência do tratamento empregado. A análise do biogás bruto mostrou uma porcentagem de 50% de CH<sub>4</sub>. A vazão de biogás era de aproximadamente 0,17 m<sup>3</sup>/h, enquanto a vazão da solução, hidróxido de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub> variou de 281 a 608 L/h. As concentrações de Ca(OH)<sub>2</sub> utilizadas no tratamento variaram de 0,1 a 0,2 mol/L.

Os resultados dos testes mostraram que, após o tratamento de purificação aqui adotado, a composição de metano no biogás foi de 86 %, empregando uma vazão de 281 e 608 L/h e concentração 0,2 mol/L da solução alcalina. A partir do estudo, foi constatado que o fatores que afetaram a mudança na quantidade de dióxido de carbono por absorção de líquido consistiram apenas na concentração da solução.

O maior poder calorífico do biogás tratado foi obtido nas seguintes condições: vazão da concentração de 281 L/h, e concentração 0,20 mol/L, e vazão da solução de 608 L/h, com concentração 0,20 mol/L.

Com relação a produção de resíduo sólido na cidade de Palmas, no ano de 2010 foi gerado 72.336 toneladas de resíduos enquanto que no ano de 2020 gerou-se 91.070 toneladas, um aumento de 25%. A produção per capita desses dois períodos foi 1,15 e 1,22 respectivamente.

### 7.2 Recomendações

Sugere-se para estudos futuros um sistema duplo para aumentar a eficiência do tratamento do biogás. Além disso, desenvolver um sistema que contemple a remoção do sulfeto de hidrogênio e água.

Recomenda-se 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.

Sugere-se estimar a quantidade de energia produzida pelo biogás através da cogeração.

## REFERÊNCIAS

ABATZOGLOU, N.; ELDRAINY, Y. A.; EL-MAGHLANY, W. M.; ATTIA, A. **A review of biogas purification processes**. Society of CHEMICAL Industry and John Wiley & Sons, Ltd, Quebec, Canadá, v. 1, n. 3, p. 42–71, jul 2008. <https://doi.org/10.1002/bbb.117>. Disponível em: < <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bbb.117> >. Acesso em 11 de fev. 2021.

ABRELPE - Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2020). **Recomendações para a gestão de resíduos sólidos durante a pandemia de coronavírus (covid-19)**. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/abrelpe-no-combate-a-covid-19/>>. Acesso em 13 de junho de 2022.

ABRELPE - Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2021). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>>. Acesso 20 de jan. 2022.

AL MAMUN, Muhammad Rashed; TORII, Shuichi. **Enhancement of Methane Concentration by Removing Contaminants from Biogas Mixtures Using Combined Method of Absorption and Adsorption**. International Journal of Chemical Engineering. 2017. 1-9. 10.1155/2017/7906859. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/ijce/2017/7906859/> >. Acesso em 15 de jun. 2022.

ANDERSON, Thomas R.; HAWKINS, Ed; JONES, Philip D. **CO<sub>2</sub>, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models, Endeavour**. Volume 40, Issue 3, 2016, Pages 178-187, ISSN 0160-9327, <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2016.07.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160932716300308>). Acesso em 02 de fev. 2021.

ANGHEBEN, A. A. (2017). **Estudo da remoção de H<sub>2</sub>S de biogás sob diferentes condições operacionais utilizando soluções contendo ferro em um sistema em escala de bancada**. Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 78p, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS (ABRELPE). **Panorama de Resíduos Sólidos, Brasil**. São Paulo: ABRELPE. 2015.

Disponível em:< [https://abrelpe.org.br/pdfs/publicacoes/atlas\\_brasileiro.pdf](https://abrelpe.org.br/pdfs/publicacoes/atlas_brasileiro.pdf)>. Acesso em 23 fev. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT - NBR 8419:

**Apresentação de Projetos de Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT - NBR 15213: **Gás natural e outros combustíveis gasosos – gasosos - Cálculo do poder calorífico, densidade absoluta, densidade relativa e índice de Wobbe a partir da composição**. classificação:

NBR-15213. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em:<

<https://www.unaerp.br/documentos/2234-abnt-nbr-10004/file>>. Acesso em 04 fev. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2004. **Resíduos sólidos –** classificação: NBR-10004. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em:<

<https://www.unaerp.br/documentos/2234-abnt-nbr-10004/file>>. Acesso em 04 fev. 2021.

**ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS É CONSIDERADO MODELO NACIONAL**.

Prefeitura de Palmas, 2009. Disponível

em:<<https://www.palmas.to.gov.br/secretaria/infraestrutura/noticia/3390/aterro-sanitario-de-palmas-e-considerado-modelo-nacional/>>. Acesso em 21 de out. 2019.

AZEVEDO, A. A. G. **Análise de viabilidade técnica e econômica do aproveitamento do biogás gerado no Aterro Sanitário de Palmas-TO**. Palmas, TO. 2021. Dissertação

(Mestrado Profissional) – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de

Palmas – Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em Engenharia Ambiental, 2021.

AWE, Olumide Wesley; ZHAO, Yaqian; NZIHOU, Ange; MINH, Doan Pham; LYCZKO, Nathalie. **A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies:**

**Review**. *Waste and Biomass Valorization*, Springer, 2017, 8 (2), p.267-283. DOI

10.1007/s12649-016-9826-4. Disponível em:<

[https://www.researchgate.net/publication/312178933\\_A\\_Review\\_of\\_Biogas\\_Utilisation\\_Purification\\_and\\_Upgrading\\_Technologies/link/59d56334458515140ee4457e/download](https://www.researchgate.net/publication/312178933_A_Review_of_Biogas_Utilisation_Purification_and_Upgrading_Technologies/link/59d56334458515140ee4457e/download)>.

Acesso em 10 fev. de 2021.

BAKONYI, Péter; KUMAR, Gopalakrishnan; BÉLAFI-BAKÓ, Katalin; KIM, Sang-Hyoun; KOTER, Stanislaw; KUJAWSKI, Wojciech; NEMESTÓTHY, Nándor; PETER, Jakub; PIENKA, Zbynek. **A review of the innovative gas separation membrane bioreactor with mechanisms for integrated production and purification of biohydrogen.**

Bioresource Technology, Volume 270, 2018, Pages 643-655, ISSN 0960-8524,

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.020>. Disponível

em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852418312653>>. Acesso em 12 fev. de 2021.

BAUER, F.; HULTEBERG, C.; PERSSON, T.; TAMM, D. **Description of the available upgrading technologies.** In: Biogas upgrading-Review of COMMERCIAL technologies. 1. ed. Malmö, Suécia: Svenskt Gastekniskt CenterAB, 2013. cap. 2, p. 16–49. Disponível

em:<[https://www.researchgate.net/publication/235932569\\_Biogas\\_upgrading\\_-\\_Review\\_of\\_commercial\\_technologies/link/02bfe5146f0b56d154000000/download](https://www.researchgate.net/publication/235932569_Biogas_upgrading_-_Review_of_commercial_technologies/link/02bfe5146f0b56d154000000/download)>. Acesso em 11 fev. 2021.

BAUER, F.; PERSSON, T.; HULTEBERG, C.; TAMM, D. **Biogas upgrading—technology overview, comparison and perspectives for the future.** Biofuels. Bioprod. Biorefining. 7, 499–511. 2013.

BEGGEL, F.; NOWIK, I. J.; MODIGELL, M.; SHALYGIN, M. G.; TEPLYAKOV, V. V.; ZENKEVITCH, V. B. **A novel gas purification system for biologically produced gases.** Journal of Cleaner Production v. 18, p. S43-S50, 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.015>. Disponível em:<

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652610002271>>. Acesso em 10 fev. 2021.

BEIL, M.; BEYRICH, W. **Biogas upgrading to biomethane.** In: WELLINGER, A., MURPHY, J., BAXTER, D. (Ed.) The biogas handbook: science, production and applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. p. 342–377.

<https://doi.org/10.1533/9780857097415.3.342> Disponível em:<  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857094988500154>>. Acesso em 14  
fev. 2021.

BERGER, Adam Hughmanick; BHOWN, Abhoyjit S. **Comparing physisorption and chemisorption solid sorbents for use separating CO<sub>2</sub> from flue gas using temperature swing adsorption**. Energy Procedia, Volume 4, 2011, Pages 562-567, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.01.089>. Disponível em:<  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211000919?via%3Dihub>>. Acesso em 10 fev. 2021.

BHOWN, A.S.; FREEMAN. B.C. **Analysis and status of post-combustion carbon dioxide capture technologies**. 2011. Environ. Sci. Technol. 45, 8624 e 8632.  
<https://doi.org/10.1021/es104291d>. Disponível em:<<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es104291d>>. Acesso em 10 fev. 2021.

BLIGHT, Geoffrey. **Landfills – Yesterday, Today and Tomorrow**. Chapter 30. Editor: Trevor M. Letcher, Daniel A. Vallero. Waste: A Handbook for Management. Academic Press. 2011. Pages 469-485. ISBN 9780123814753. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381475-3.10030-0>. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123814753100300>>. Acesso em 04 fev. 2021.

BOGNER, J.; PIPATTI, R.; HASHIMOTO, S.; DIAZ, C.; MARECKOVA, K.; DIAZ, L.; KJELDSSEN, P.; MONNI, S.; FAALJ, A.; SUTAMIHARDJA, R.T.M.; GREGORY, R. **Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Working Group III (Mitigation)**. Waste Management Research, 2008, v. 26, p. 11-32. doi:10.1177/0734242x07088433. Disponível em:<  
[https://www.researchgate.net/publication/5513043\\_Mitigation\\_of\\_Global\\_Greenhouse\\_Gas\\_Emissions\\_from\\_Waste\\_Conclusions\\_and\\_Strategies\\_from\\_the\\_Intergovernmental\\_Panel\\_on\\_Climate\\_Change\\_IPCC\\_Fourth\\_Assessment\\_Report\\_Working\\_Group\\_III\\_Mitigation](https://www.researchgate.net/publication/5513043_Mitigation_of_Global_Greenhouse_Gas_Emissions_from_Waste_Conclusions_and_Strategies_from_the_Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change_IPCC_Fourth_Assessment_Report_Working_Group_III_Mitigation)>. Acesso em 22 dez. 2019.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010. Disponível em:< [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em 04 fev. 2021.

BUTTI, Luciano *et al.* **Legal Framework of Landfilling in Different Areas of the World**. Chapter 1.3. Editor(s): Raffaello Cossu, Rainer Stegmann. Solid Waste Landfilling. Elsevier, 2018. Pages 41-50. ISBN 9780128183366, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407721-8.00003-6>. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124077218000036>>. Acesso em 05 de fev. 2021.

COSSU, Raffaello; STEGMANN, Rainer. **Landfill Planning and Design**. Chapter 13.2. Editor(s): Raffaello Cossu, Rainer Stegmann, Solid Waste Landfilling. Elsevier, 2018. Pages 755-772, ISBN 9780128183366, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407721-8.00035-8>. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124077218000358>>. Acesso em 05 de fev. 2021.

DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelika. **Biogas from waste and renewable resources**. Weinheim: WILEYVCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. DOI:10.1002/9783527621705.

DA SILVA, Marci; MEZZARI, Melissa. Tratamento e purificação de biogás - Capítulo IV. 2019. DOI 10.21452/978-85-93823-01-5.2019.01\_4. Disponível em:< [https://www.researchgate.net/publication/333439430\\_Tratamento\\_e\\_purificacao\\_de\\_biogas\\_-\\_Capitulo\\_IV](https://www.researchgate.net/publication/333439430_Tratamento_e_purificacao_de_biogas_-_Capitulo_IV)>. Acesso em 11 fev. 2021.

FRANÇA JUNIOR, Antonio Tavares de. **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto**/Antonio Tavares de França Junior. - Ilha Solteira : [s.n.], 2008. 148 f. : il. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008. Disponível em:< [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/88894/francajunior\\_at\\_me\\_ilha.pdf?sequence=1](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/88894/francajunior_at_me_ilha.pdf?sequence=1)>. Acesso em 23 fev. 2021.

FREDDO, A. **Estudo da Remoção de Dióxido de Carbono e Sulfeto de Hidrogênio de Biogás Utilizando Soluções Absorvedoras**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, p. 128. 2017. Disponível em:<  
[https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2950/2/MD\\_PPGTAMB\\_M\\_Freddo%2C%20Alessandra\\_2017.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2950/2/MD_PPGTAMB_M_Freddo%2C%20Alessandra_2017.pdf)>. Acesso em 10 de janeiro de 2022.

FRONDIZI, I.M.R.L. **O mecanismo de desenvolvimento limpo: guia de orientação 2009**. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio, FIDES, 2009. 136 p. Disponível em:<  
[https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/guia\\_md1\\_mct\\_2009.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/guia_md1_mct_2009.pdf) >. Acesso em 23 fev. 2021.

GARCILASSO, V. P.; VELÁZQUEZ, S. G.; COELHO, S. T. **Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás Proveniente de Aterro Sanitário – Estudo de Caso**. XIII CBE - Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 2010.

GOOGLE. Google Earth website. Disponível em:<<http://earth.google.com/>>. Acesso em 21 abr. 2021.

GUGLIUZZA, Annarosa; BASILE, Angelo. **Membranes for clean and renewable Power Applications**. 1st edition, Ed. Woodhead Publishing, 438p, 2013.

HAGEN, M.; POLMAN, Erik. **Adding gas from biomass to the gas grid**. Final Report Submitted to Danish Gas Agency. Pag 27-33. 2001. Disponível em:<  
[https://www.researchgate.net/publication/291301268\\_Adding\\_gas\\_from\\_biomass\\_to\\_the\\_gas\\_grid](https://www.researchgate.net/publication/291301268_Adding_gas_from_biomass_to_the_gas_grid)>. Acesso em 09 fev. 2021.

HE, Xuezhong; FU, Chao; HÄGG, May-Britt. **Membrane system design and process feasibility analysis for CO<sub>2</sub> capture from flue gas with a fixed-site-carrier membrane**, Chemical Engineering Journal, Volume 268, 2015, Pages 1-9, ISSN 1385-8947,  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.12.105>. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894714017288>. Acesso em 14 fev. 2021.

HORIKAWA, M.S.; ROSSI, F.; GIMENES, M.L.; COSTA, C.M.M.; SILVA, M.G.C. **Chemical absorption of H<sub>2</sub>S for biogas purification. Brazilian Journal Of Chemical Engineering.** v. 21, n. 3, p.415-422, set. 2004. Fap-UNIFESP (SciELO). Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-66322004000300006](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-66322004000300006)>. Acesso em 21 de out. 2019.

IANNICELLI, André L. **Reaproveitamento energético de uma empresa cervejeira.** 2008. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2008. Disponível em:< <http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/702/1/Andre%20Luiz%20Iannicelli.pdf>>. Acesso em 20 fev. 2021.

IPCC, 2013: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324. Disponível em:< [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf)>. Acesso em 02 fev. 2021.

KHALILPOUR, Rajab; MUMFORD, Kathryn; ZHAI, Haibo; ABBAS, Ali; STEVENS, Geoff; RUBIN, Edward S. **Membrane-based carbon capture from flue gas: a review,** Journal of Cleaner Production, Volume 103, 2015, Pages 286-300, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.050>. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614010920>>. Acesso em 13 fev. 2021.

KRICH, K; DON, Augenstein; BATMALE, J.P.; BENEMANN, J.; RUTLEDGE, B.; SALOUR, D. **Biomethane from dairy waste: a sourcebook for the production and use of renewable natural gas in California.** Sacramento, California: Western United Dairymen. 2005. Disponível em:<[http://www.suscon.org/pdfs/news/biomethane\\_report/Full\\_Report.pdf](http://www.suscon.org/pdfs/news/biomethane_report/Full_Report.pdf)>. Acesso em 07 fev. 2021.

LETCHER, Trevor M. **1 - Global warming—a complex situation**. Editor(s): Trevor M. Letcher, *Climate Change (Third Edition)*, Elsevier, 2021, Pages 3-17, ISBN 9780128215753, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00001-3>. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128215753000013>>. Acesso em 21 abr. 2021.

LIM, Xin-Le; LAM, Wei-Haur. **Review on Clean Development Mechanism (CDM) implementation in Malaysia**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 29, 2014, Pages 276-285, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.106>. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006552>>. Acesso em 23 fev. 2021.

LIMA, Felipe Palma. **Energia no tratamento de esgoto: Análise tecnológica e institucional para conservação de energia e uso do biogás**. (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em:<<http://www.dominipublico.gov.br/download/texto/cp001876.pdf>>. Acesso em 22 fev. 2021.

LÓPEZ, Juan C. *et al.* **Biotechnologies for greenhouse gases (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and CO<sub>2</sub>) abatement: state of the art and challenges**. *Appl Microbiol Biotechnol* 97, 2277–2303 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00253-013-4734-z>. Disponível em:<<https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-013-4734-z>>. Acesso em 02 fev. 2021.

MARIANI, Leidiane. **Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil**. 2018. 1 recurso online (144 p.). Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em:<[http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/333144/1/Mariani\\_Leidiane\\_D.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/333144/1/Mariani_Leidiane_D.pdf)>. Acesso em 22 fev. 2021.

MARQUES, M. S. **Qualidade ambiental e estudo da produção e aproveitamento energético do biogás produzido pelo aterro sanitário de Palmas–TO**. Palmas, TO. 2019. Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal do Tocantins – Campus

Universitário de Palmas – Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em Engenharia Ambiental, 2019.

MARQUES J. E. S.; AZEVEDO A. A. G. **O que faço com meu lixo? Resíduos sólidos da geração à destinação final.** Editora Kelps 1ª edição - Goiânia – GO, 2019.

MARQUES J. E. S.; AZEVEDO A. A. G. **¿Qué hago con mi basura? Resíduos Sólidos, de la generación a la destinación final.** Editora Kelps 1ª edição - Goiânia – GO, 2019

MITARITEN, M. J. **Landfill gas upgrading process.** U.S. Patent Application 11/233,762, 23 set. 2005.

MONTEIRO, S. D. da S. C. **Produção de biometano: análise de mercado e estudo da separação por PSA.** 2011. 55 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Química) – Universidade do Porto, Portugal, 2011. Disponível em:< <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/69219/1/000150475.pdf>>. Acesso em 07 fev. 2021.

NASCIMENTO, Maria Cândida Barbosa; FREIRE, Elcires Pimenta; DANTAS, Francisco de Assis Souza; GIANSANTE, Miguel Bortoletto. **Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil.** Eng. Sanit. Ambient. [online]. 2019, vol.24, n.1, pp.143-155. Epub Apr 01, 2019. ISSN 1809-4457. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019171125>. Disponível em:< [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522019000100143&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522019000100143&tlng=pt)>. Acesso em 12 abr. 2021.

OKAMURA, L. A. **Avaliação e Melhoria do Poder Calorífico de Biogás Proveniente de Resíduos Sólidos Urbanos.** 2013, 110 fl. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em: <[http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/bitstream/1/637/1/CT\\_PPGCTA\\_M\\_Okamura%20%20Layssa%20Aline\\_2013.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/bitstream/1/637/1/CT_PPGCTA_M_Okamura%20%20Layssa%20Aline_2013.pdf)>. Acesso em 26 dez. 2019.

OMS – Organização Mundial de Saúde. **Critério de Saúde Ambiental**. 2000. Disponível em: <<http://www.mre.gov.br/cdbrasil/itamaraty/w eb/port/relext/ mre/nacun/agespec/oms/>>. Acesso em 05 jan. 2020.

PERSOON, Margareta. **Evaluation of biogas upgrade techniques**. Swedich Gas Center, Malmo, Sweden. 2003. Disponível em:< <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC142.pdf>>. Acesso em 07 fev. 2021.

PERSOON, M.; JONSSON, O.; WELLINGER, A. **Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection**. Report SCG 142, IEA Bioenergy, Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas. 2006. Disponível em:< [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2007/12/upgrading\\_report\\_final.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2007/12/upgrading_report_final.pdf)>. Acesso em 13 fev. 2021.

PETERSSON, Anneli; WELLINGER, Arthur. **Biogas upgrading technologies – developments and Innovations**. IEA Bioenergy, Lille, 2007. Disponível em: <[https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2009/10/upgrading\\_rz\\_low\\_final.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2009/10/upgrading_rz_low_final.pdf)>. Acesso em 07 fev. 2021.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PALMAS. SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA E SERVIÇOS PÚBLICOS. Palmas-Tocantins, 2022.

RAMÍREZ, Martín; GÓMEZ, J.; D, Cantero. (2015). **Biogas: sources, purification and uses**. Disponível em:< [https://www.researchgate.net/publication/312899782\\_Biogas\\_sources\\_purification\\_and\\_uses](https://www.researchgate.net/publication/312899782_Biogas_sources_purification_and_uses) >. Acesso em 23 fev. 2021.

RAO, M.N.; SULTANA, Razia; KOTA, Sri Harsha. **Chapter 10 - Landfill Gases**. Solid and Hazardous Waste Management. Butterworth-Heinemann, 2017. Pages 303-313, ISBN 9780128097342, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809734-2.00010-9>. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128097342000109>>. Acesso em 02 fev. 2021.

REICHLER, David E. **Chapter 11 - Anthropogenic alterations to the global carbon cycle and climate change**, Editor(s): David E. Reichle, The Global Carbon Cycle and Climate

Change, Elsevier, 2020, Pages 209-251, ISBN 9780128202449, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820244-9.00011-1>. Disponível

em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128202449000111>>. Acesso em 21 abr. 2021.

RENA; GAUTAM, Pratibha; KUMAR, Sunil. **Chapter 6 - Landfill Gas as an Energy Source**. Editor(s): Sunil Kumar, Rakesh Kumar, Ashok Pandey, Current Developments in Biotechnology and Bioengineering, Elsevier, 2019, Pages 93-117, ISBN 9780444640833, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64083-3.00006-3>. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444640833000063>>. Acesso em 22 fev. 2021.

RITZKOWSKII, Marco. **Chapter 21.3 - Clean Development Mechanism (CDM) in Landfilling**. Editor(s): Raffaello Cossu, Rainer Stegmann, Solid Waste Landfilling, Elsevier, 2018, Pages 1141-1152, ISBN 9780128183366, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407721-8.00056-5>. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124077218000565>>. Acesso em 23 fev. 2021.

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 3a. ed, Campinas (SP), Ed. Cárita, 358p., 2014.

RYCKEBOSCH, Eline; MARGRIET, Drouillon; HAN, Vervaeren. **Techniques for transformation of biogas to biomethane**. Biomass and Bioenergy. Volume 35. 2011. Pages 1633-164. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.033>. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411001085>>. Acesso em 07 fev. 2021.

SAHA, Shouvik; BASAK, Bikram; HWANG, Jae-Hoon; SALAMA, El-Sayed; CHATTERJEE, Pradip K.; JEON, Byong-Hun. **Microbial Symbiosis: A Network towards Biomethanation, Trends in Microbiology**. Volume 28, Issue 12. 2020. Pages 968-984, ISSN 0966-842X, <https://doi.org/10.1016/j.tim.2020.03.012>. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966842X20300834>>. Acesso em 18 fev. 2021.

SALOMON, K. R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. 2007, 247 fl. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais. 2007. Disponível em:<  
[https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1721/tese\\_0032785.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1721/tese_0032785.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em 18 fev. 2021

SEMAN, S.Z.A.; IDRIS, I.; ABDULLAH, A.; SHAMSUDIN, I.K.; OTHMAN, M.R. **Optimizing purity and recovery of biogas methane enrichment process in a closed landfill**, Renewable Energy, Volume 131, 2019, Pages 1117-1127, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.057>. Disponível em:<  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118310073>>. Acesso em 20 fev. 2021.

SGC – SWEDISH GAS TECHNOLOGY CENTRE LTD. **Basic data on biogas**. 2ªed., 29 fl., 2012. Disponível em:<<http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/BasicDataonBiogas2012.pdf>>. Acesso em 22 fev. 2021.

SCHIAVON MAIA, D. C.; LENZI, G. G.; ARROYO, P. A.; FRARE, L. M.; GIMENES, M. L.; PEREIRA, N. C. **Estudo da purificação de biogás para uso energético pela absorção de H<sub>2</sub>S E CO<sub>2</sub>**. ENEMP. Disponível em:< [https://www.researchgate.net/profile/Nehemias-Pereira/publication/301415709\\_estudo\\_da\\_purificacao\\_de\\_biogas\\_para\\_uso\\_energetico\\_pela\\_absorcao\\_de\\_h2s\\_e\\_co2/links/575aab4708aec91374a61366/estudo-da-purificacao-de-biogas-para-uso-energetico-pela-absorcao-de-h2s-e-co2.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Nehemias-Pereira/publication/301415709_estudo_da_purificacao_de_biogas_para_uso_energetico_pela_absorcao_de_h2s_e_co2/links/575aab4708aec91374a61366/estudo-da-purificacao-de-biogas-para-uso-energetico-pela-absorcao-de-h2s-e-co2.pdf)>. Acesso em 20 de janeiro de 2022.

SHAH, Goldy; AHMAD, Ejaz; PANT, K.K.; VIJAY, V.K. **Comprehending the contemporary state of art in biogas enrichment and CO<sub>2</sub> capture technologies via swing adsorption**. International Journal of Hydrogen Energy. Volume 46. Issue 9. 2021. Pages 6588-6612. ISSN 0360-3199. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.116>.

Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920343226>.

Acesso em 03 fev. 2021.

SILVA, C.A.B.V. **Limpeza e Purificação de Biogás**. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2009.

Disponível em:< <https://docplayer.com.br/5309572-Limpeza-e-purificacao-de-biogas.html>>.

Acesso em 22 fev. 2021.

SOARES, C.M.C. **Compósitos céria / sais alcalinos para membranas de separação de CO<sub>2</sub>** 2012. 100p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Materiais) - Universidade de Aveiro, 2012. Disponível em: <<https://ria.ua.pt/handle/10773/9v805>>. Acesso em 15 fev. 2021.

SOUZA FILHO, J.D.V. **Utilização de peneira molecular para purificação do gás de aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) –

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em:<

[http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/23534/1/2016\\_dis\\_jdvsouzafilho.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/23534/1/2016_dis_jdvsouzafilho.pdf)>. Acesso em 19 dez. 2019.

SRICHAT, A.; SUNTIVARAKORN, R.; KAMWILAISAK, K. **A Development of Biogas Purification System Using Calcium Hydroxide and Amine Solution**. Energy Procedia, Volume 138, 2017, Pages 441-445, ISSN 1876-6102,

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.196>. Disponível

em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217351391>>. Acesso em 01 jan. 2021.

SYED, M.; SOREANU, Gabriela; FALLETTA, Patricia; BÉLAND, M. **Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes - A review**. Canadian Biosystems Engineering / Le Genie des biosystems au Canada. 2006. Disponível em:<

[https://www.researchgate.net/publication/237379501\\_Removal\\_of\\_hydrogen\\_sulfide\\_from\\_gas\\_streams\\_using\\_biological\\_processes\\_-\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/237379501_Removal_of_hydrogen_sulfide_from_gas_streams_using_biological_processes_-_A_review)>. Acesso em 13 fev. 2021.

TORRES, Roxana Ángeles. MARÍN, David. RODERO, María del Rosario. PASCUAL, Celia. GONZÁLEZ-SANCHEZ, Armando. CRESPO, Ignacio de Godos. LEBRERO, Raquel. TORRE, Raúl Muñoz. **Chapter 8 - Biogas treatment for H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, and other**

**contaminants removal**, Editor(s): Gabriela Soreanu, Éric Dumont, From Biofiltration to Promising Options in Gaseous Fluxes Biotreatment, Elsevier, 2020, Pages 153-176, ISBN 9780128190647, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819064-7.00008-X>. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012819064700008X>>. Acesso em 21 abr. 2021.

U.S. Army Corps of Engineers. **Landfill Gas Collection and Treatment Systems Engineer Manual**. 2013. Disponível em:<  
[http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM\\_200-1-22.pdf?ver=2013-09-05-152155-217](http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_200-1-22.pdf?ver=2013-09-05-152155-217)>. Acesso em 22 fev. 2021.

Ventura, Katia Sakihama et al. Análise dos impactos da COVID-19 à coleta de resíduos sólidos domiciliares, recicláveis e de serviços de saúde no município de Araraquara (SP), Brasil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental* [online]. 2021, v. 26, n. 4 [Acessado 13 Junho 2022], pp. 775-784. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-415220200309>>. Epub 11 Out 2021. ISSN 1809-4457. Acesso em 13 de junho de 2022.

YANG, L.; GE, X.: **Chapter Three - Biogas and Syngas Upgrading**. Editor(s): Yebo Li, Xumeng Ge, *Advances in Bioenergy*, Elsevier, Volume 1, 2016, Pages 125-188, ISSN 2468-0125, ISBN 9780128095225. <https://doi.org/10.1016/bs.aibe.2016.09.003>. Disponível em :<  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468012516300037>>. Acesso em 10 fev. 2021.

YANG, Ji-Won; KWON, Tae-Soon; LEE, Jae-Young. **Effective CO<sub>2</sub> Removal by *Chlorella Sp. HA-1* in Various Cultivation Methods**. Editor(s): J. Gale, Y. Kaya, *Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference*, Pergamon, 2003, Pages 1445-1450, ISBN 9780080442761, <https://doi.org/10.1016/B978-008044276-1/50229-4>. Disponível em:<  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080442761502294>>. Acesso em 12 fev. 2021.

YOUSEF, Ahmed; ELDRAINY, Yehia; EL-MAGHLANY, Wael; ATTIA, Abdelhamid. **Upgrading biogas by a low-temperature CO<sub>2</sub> removal technique**. 2016. *Alexandria Engineering Journal*. 55. DOI 1143–1150. [10.1016/j.aej.2016.03.026](https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.03.026). Disponível em:<

[https://www.researchgate.net/publication/299589158\\_Upgrading\\_biogas\\_by\\_a\\_low-temperature\\_CO2\\_removal\\_technique](https://www.researchgate.net/publication/299589158_Upgrading_biogas_by_a_low-temperature_CO2_removal_technique)>. Acesso em 10 fev. de 2021.

YUE, Xi-Liu. GAO, Qing-Xian. **Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions**. Advances in Climate Change Research, Volume 9, Issue 4, 2018, Pages 243-252, ISSN 1674-9278, <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.12.003>. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674927818300376>>. Acesso em 21 abr. 2021.