



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Recife

Tecnologia em Gestão Ambiental

CAMILA FREIRE NUNES

**ESTUDO DA INTERAÇÃO ROCHA-FLUIDO COMO ALTERNATIVA DE  
TRATAMENTO DE BIOGÁS DE ATERROS**

Recife

2022

CAMILA FREIRE NUNES

**ESTUDO DA INTERAÇÃO ROCHA-FLUIDO COMO ALTERNATIVA DE  
TRATAMENTO DE BIOGÁS DE ATERROS**

Monografia apresentada a Coordenação do Curso de Tecnologia em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Tecnólogo em Gestão Ambiental.  
Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dra. Alessandra Lee Barbosa Firmo

Recife  
2022

N972e

2022 Nunes, Camila Freire

Estudo da interação rocha-fluido como alternativa de tratamento de biogás de aterros. /  
Camila Freire Nunes. --- Recife: A autora, 2022.  
45f. il. Color.

TCC (Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental) – Instituto Federal de  
Pernambuco, Departamento Acadêmico de Cursos Superiores - DACS, 2022.

Inclui Referências.

Orientadora: Professora Me. Alessandra Lee Barbosa Firmo.

1. Armazenamento de CO<sub>2</sub>. 2. Biogás. 3. Purificação. I. Título. II. Firmo,  
Alessandra Lee Barbosa Firmo (orientadora). III. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 665.776

Catálogo na fonte Danielle Castro da Silva CRB4/1457

CAMILA FREIRE NUNES

**ESTUDO DA INTERAÇÃO ROCHA-FLUIDO COMO ALTERNATIVA DE  
TRATAMENTO DE BIOGÁS DE ATERROS**

Monografia aprovada como requisitos finais do Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Tecnólogo em Gestão Ambiental ao término do Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco.

COMISSÃO EXAMINADORA

---

Dra. Alessandra Lee Barbosa Firmo

---

Examinador interno- Prof. MSc. Carlos Eduardo Menezes

---

Examinador externo- Prof. MSc. Katia Botelho Galindo

Examinador

Trabalho Aprovado em: 09 de maio de 2022

## **AGRADECIMENTOS**

Com todo meu coração, ofereço essa gratidão primeiramente às minhas Orientadora e Co- Orientadora, Alessandra Lee e a Kátia Galindo, por sempre terem acreditado em mim, me impulsionado, e tornado esse processo muito mais feliz. À Alessandra, agradeço imensamente por sempre ter tido paciência, me ajudado, me guiado e me dado a honra de aprender com ela, pois sem ela nada desse estudo teria sido possível. À Kátia, que tem todo o meu amor, obrigada por ter se tornado uma amiga que levarei por toda a minha vida e por sempre ter sido uma inspiração pra mim, tanto acadêmica como pessoal.

Agradeço com tamanha intensidade à minha família que sempre esteve presente em todos os processos, segurando a minha mão, me incentivando e apoiando sem me deixar desistir, mesmo nos momentos de maiores dificuldades.

Ao Deodorio Souza pelo apoio, à Guttemberg e à Brito pela disponibilidade, ajuda e simpatia de todos os dias, meus mais sinceros agradecimentos.

Ao Instituto Federal de Educação e Ciência de Pernambuco (IFPE) agradeço pelo sentimento de casa e acolhimento em todos esses anos, além do constante incentivo a pesquisa e auxílio para com os alunos.

À todos, que de alguma forma, direto ou indiretamente, contribuíram e incentivaram a minha trajetória, vocês foram essenciais para minha chegada até aqui, minha grande gratidão!

## EPÍGRAFE

“Seja a mudança que você deseja ver no mundo”  
Mahatma Gandhi

## RESUMO

A crise energética enfrentada pelo mundo tem sua origem no esgotamento previsível das fontes de energia não renováveis atualmente disponíveis. Em um curto período de tempo estes recursos produziram grandes concentrações de poluentes, precursores de diversos problemas ambientais enfrentados pela humanidade. Diante disso, a necessidade de se obter fontes de energias renováveis mais viáveis e eficazes se torna urgente e o biogás consiste em uma alternativa a esses problemas. Quando purificado, o biogás pode ser usado tanto como energia renovável, dependendo do modo de purificação, quanto também como uma tecnologia capaz de diminuir a emissão dos gases do efeito estufa para a atmosfera. Deste modo, observou-se a possibilidade de se purificar o biogás a partir de um meio poroso, construído em laboratório, com o objetivo de avaliar as modificações físicas ocorridas nesta amostra. Sendo assim, para a realização dos 03 (três) ensaios laboratoriais precisou-se instrumentar e adaptar uma célula de inox (reator) capaz de manter a temperatura e a pressão controladas durante a realização do experimento. Posteriormente, se inseriu um fluxo de 40% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e 60% metano ( $\text{CH}_4$ ) no reator, de forma que ao ser medido o percentual de gases após a realização do ensaio, por meio dos equipamentos Drager e Geotech, foi possível obter resultados satisfatórios quando se observou que o meio poroso é capaz de filtrar o  $\text{CO}_2$  inserido. Tal análise pôde ser concluída pois ao final do experimento tanto a porcentagem de gás carbônico passou a ser 0%, quanto pode-se observar que o peso da amostra foi aumentado, se comparado ao início do experimento. Sendo assim, o meio poroso pode ser utilizado como forma de purificação do biogás, de modo que o poder calorífico do metano possa ser aumentado e o biogás se torne uma forma eficaz de energias renovável. Conclui-se que os resultados obtidos nestes experimentos servem como base para o desenvolvimento de novos materiais para tratamento e purificação do biogás.

Palavras-chave: Armazenamento de  $\text{CO}_2$ . Biogás. Purificação.

## ABSTRACT

The energy crisis facing the world has its origin in the predictable sizing of currently available non-renewable energy sources. In large time spans of uptime, harbingers of various problems and small resources for mankind. In view of this, the need to obtain more renewable energy sources becomes urgent and biogas is an alternative to these problems. When purified, biogas can be used both as it can affect the efficiency of the purification mode and as the technology, once it reduces the emission of gases, it can also cause a greenhouse effect to the atmosphere. In this way, it was possible to purify the biogas from a porous medium, built in a laboratory, with the objective of evaluating how physicists occurred in this laboratory. Therefore, to carry out the 03 (three) laboratory tests, it was necessary to instrument and adapt a stainless steel cell (reactor) capable of keeping the temperature and pressure controlled during the experiment. Subsequently, insert a flow of 40% carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and 60% methane (CH<sub>4</sub>) into the reactor, so that, when the average or percentage of gases after the test was carried out, using Drager and Geotech equipment, it was obtain satisfactory results when it was observed that the porous medium is capable of the inserted CO<sub>2</sub>. Such analysis could be completed at the end of the experiment both to be started to be tested and the sample weight was increased, if at the beginning of the experiment. Thus, the medium can be used as a way of purifying biogas, so that the calorific value of methane can be increased and biogas becomes an effective form of renewable energy. It is concluded that the results obtained in these experiments are necessary as a basis for the development of new materials for the treatment and purification of biogas.

Keywords: CO<sub>2</sub> storage. biogas. Purification.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 -Aterro Sanitário.....   | 19 |
| Figura 2 - Sistema esquemático do biogás no aterro .....  | 24 |
| Figura 3 -Processo de purificação do biogás por membranas .....   | 26 |
| Figura 4 - Manômetro de controle de pressão (a); Caixa de controle de temperatura (b); Reator de inox (c) .....   | 27 |
| Figura 5 -Aterro Mistura do material na célula de molde (A); Colocação da mistura em uma célula de molde (B); Compactação do meio poroso na prensa mecânica (C); Carbonatação da amostra (D); Extração da amostra em um extrator mecânico (E); Amostra bruta (F); Meio poroso lixado 3,6 cm (G); Montagem do ensaio na célula de inox (H); Medição do percentual de CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub> antes do ensaio (I); Inserção do fluxo de gases para início do ensaio (J); Equipamento utilizado para medir o percentual dos gases depois do ensaio: Geotech (K); Drager (L)..... | 31 |

## Lista de tabelas

|           |       |    |
|-----------|-------|----|
| Tabela 01 | ..... | 37 |
| Tabela 02 | ..... | 38 |
| Tabela 03 | ..... | 39 |

## Lista de abreviaturas e siglas

|                    |   |
|--------------------|---|
| ABNT               | Associação Brasileira de Normas técnicas                                |
| Abtre              | Associação Brasileira de Tratamento de Resíduos e Afluentes             |
| BBC                | British Broadcasting Corporation (Corporação Britânica de Radiodifusão) |
| CACO <sub>3</sub>  | Carbonato de cálcio   |
| CEE                | Câmara de Comercialização de Energia Elétrica                           |
| CFC's              | Clorofluorcarbonos  |
| CH <sub>4</sub>    | Metano  |
| CO                 | Monóxido de carbono   |
| CO <sub>2</sub>    | Dióxido de carbono  |
| COP-21             | Conferência das Partes  |
| EPE                | Empresa de pesquisa energética  |
| GEE                | Gases do Efeito Estufa  |
| GLP                | Gás Liquefeito de Petróleo  |
| H <sub>2</sub> S   | Ácido sulfídrico  |
| IBGE               | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                         |
| IPCC               | Intergovernmental Panel on Climate Change                               |
| KPA                | Quilopascal   |
| M <sup>3</sup>     | Metros cúbicos  |
| MMA                | Ministério do Meio Ambiente   |
| Mt CO              | Milhões de Toneladas de Monóxido de Carbono                             |
| Mt CO <sub>2</sub> | Milhões de Toneladas de Dióxido de Carbono                              |
| N <sub>2</sub>     | Nitrogênio  |
| N <sub>3</sub> O   | Óxido Nitroso   |
| NBR                | Norma Brasileira  |
| NDC                | Contribuição Nacionalmente Determinada                                  |
| NH <sub>3</sub>    | Amoníaco ou Amônia  |
| O <sub>2</sub>     | Oxigênio  |
| ONU                | Organização das Nações Unidas   |
| PNMC               | Política Nacional sobre Mudanças do Clima                               |
| PNRS               | Política Nacional de Resíduos Sólidos                                   |

|                 |   |
|-----------------|---|
| PPM             | Partes por milhão   |
| RSU's           | Resíduos Sólidos Urbanos  |
| SEEG            | Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de EfeitoEstufa. |
| SF <sub>6</sub> | Hexafluoreto de enxofre   |
| UNFCCC          | Convenção quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas            |
| WWF             | World Wide Fund for Nature  |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO .....  | 14 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....   | 17 |
| 2.1 Mudanças Climáticas .....   | 17 |
| 2.2 Aterros Sanitários .....  | 19 |
| 2.3 Energia .....   | 21 |
| 2.4 Biogás .....  | 22 |
| 2.4.1 Biogás de aterro .....  | 23 |
| 2.5 Mecanismos de purificação de gás .....  | 25 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS .....   | 30 |
| 3.1 Ensaio de injeção de CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub> com reator de inox ..... | 31 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....  | 37 |
| 5 CONCLUSÃO .....   | 41 |
| 6 REFERÊNCIAS .....   | 42 |

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais representam um dos maiores desafios atuais da humanidade. A crescente emissão dos GEE (gases do efeito estufa), quer seja através do gás metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), ou outros GEE, mas principalmente através do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), gera sérios problemas à atmosfera do planeta (BEEBE,2009). Segundo o Global Carbon Atlas (2019) a humanidade lançou 36.441MtCO<sub>2</sub> na atmosfera. No mundo, a China encontra-se em primeiro lugar no ranking de emissão de CO<sub>2</sub>, liberando 10175 MtCO<sub>2</sub> no ano e, essa colocação se mantém com o país desde 2007, quando houve um forte crescimento econômico baseado principalmente em combustíveis fósseis.

Já o Brasil, de acordo com o Global Carbon Atlas (2019) se encontra em décimo terceiro lugar nesse mesmo ranking, com emissão de 485 MtCO<sub>2</sub>. Por outro lado, dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2020) afirmam que o país ocupa o sexto lugar, no mesmo ano. Contudo, apesar das divergências, ele ainda se encontra entre os quinze países que mais contribuem para o agravamento do aquecimento global e das mudanças climáticas. Além disso, ainda de acordo com a mesma fonte, “as emissões per capita do Brasil são maiores que a média mundial. Em 2019, a média de emissão de CO<sub>2</sub> por brasileiro foi de 10,4 toneladas brutas, contra 7,1% da média mundial”.

Neste sentido, o Brasil instituiu a Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC), por meio da Lei nº 12.187/2009, que define o compromisso nacional voluntário de adoção de ações de mitigação com vistas a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE). No artigo 12 desta lei, ficou decidido que :

Art. 12. Para alcançar os objetivos da PNMC, o País adotará, como compromisso nacional voluntário, ações de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, com vistas em reduzir entre 36,1% (trinta e seis inteiros e um décimo por cento) e 38,9% (trinta e oito inteiros e nove décimos por cento) suas emissões projetadas até 2020.

Desde a regulamentação da PNMC, em 2010, as emissões cresceram 9,2% (SEEG, 2020). Em contrapartida, na COP-21 (21ª Conferência das Partes), realizada em Paris no ano de 2015, foi definido o novo acordo sobre a mudança global do clima. Neste acordo, a partir da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), 55

países se comprometeram em diminuir as suas emissões de gases estufa. O compromisso brasileiro foi de redução dos GEE em 37% até o ano de 2025, quando comparado aos dados relatados no ano de 2005. Em 2020, ano em que acordo começa a ser oficialmente implementado, medidas recentes apontam retrocessos no direcionamento das metas, visto que em 2030 o país deveria cumprir a meta de redução em 43% (SILVA, 2019).

Dessa forma, o Brasil precisa estabelecer métodos de ação que visem à atenuação das emissões desses gases. Bem como previsto no artigo 5º, VI, “a”, da Lei 12.187/2009, são diretrizes da Política Nacional sobre Mudança do Clima (BRASIL, 2010):

VI - a promoção e o desenvolvimento de pesquisas científico-tecnológicas, e a difusão de tecnologias, processos e práticas orientados a:

a) mitigar a mudança do clima por meio da redução de emissões antrópicas por fontes e do fortalecimento das remoções antrópicas por sumidouros de gases de efeito estufa

De acordo com o relatório anual da ONU (2022), se as emissões globais de CO<sub>2</sub> continuarem altas, o balanço global orçamento de carbono para manter o aquecimento em 1,5°C provavelmente se esgotará antes de 2030.

Sendo assim, existe a necessidade de estudar e desenvolver novas tecnologias e atividades para a redução de emissões desse gás, tais como o uso mais eficiente da energia, substituição dos combustíveis fósseis por outros com menor conteúdo de carbono, utilização de soluções energéticas que façam o emprego de fontes de energia renováveis e até o armazenamento do CO<sub>2</sub> em formações geológicas (IPCC, 2005).

O armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>, que consiste em capturar e imobilizar esse gás em locais que não afetem os ecossistemas e onde não exista a possibilidade de vazamentos. Dependendo da composição das rochas e fluidos e da evolução temporal da injeção do CO<sub>2</sub>, as interações rocha-fluido podem ter um impacto significativo na segurança e capacidade do armazenamento (LINS *et al.*, 2012). E, segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC (2005), esta pode ser uma atividade capaz de realizar uma mitigação da emissão de CO<sub>2</sub> em nível mundial.

Além disso, dentre essas tecnologias, destaca-se a purificação do biogás, que consiste na retirada dos gases que ocasionam algum tipo de dano à qualidade do biogás, como o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{H}_2\text{S}$  (ácido sulfídrico). Esse biogás pode ser encontrado em aterros sanitários (FIRMO, A.L.B., ET. AL., 2017) e o tratamento ou purificação é um processo determinante para a utilização do mesmo como fonte de biocombustível. Para isso existem algumas técnicas, mas podemos citar o uso de membranas porosas para reduzir as emissões gasosas, principalmente de gases como  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{NH}_3$ , não havendo o controle da emissão de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera, visto que não foram desenvolvidos materiais viáveis de uso em escala real que consigam capturar este gás (MEZZARI; SILVA, 2019).

Assim, o objetivo estratégico desta pesquisa consiste em avaliar, através de experimentos, as modificações físicas ocorridas em um meio poroso ou rocha submetido à injeção de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ .

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver experimentos de laboratório para estudo de tratamento de biogás;
- Levantar e aplicar materiais porosos com base em  $\text{Ca}(\text{OH})$  para tratamento de biogás;
- Avaliar quanto o  $\text{CO}_2$  pode ser reduzido com o uso do material poroso sintético para tratamento de biogás.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Mudanças climáticas

O cenário mundial de produção de energia tem sofrido transformações devido às pressões exercidas pela necessidade de preservação das condições ambientais, uma vez que, as principais tecnologias utilizadas atualmente para a produção de energia tem como consequência a emissão de gases de efeito estufa (GEE)(SOUZA,2016).

As emissões de GEEs antrópicas aumentaram sobremaneira desde a era pré-industrial, resultantes do desenvolvimento econômico e do crescimento populacional, e estão no nível mais elevado desde então. Isso ocasionou o lançamento na atmosfera de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso em montantes sem precedentes nos últimos 800 mil anos (IPCC, 2014). Esta emissão está alterando as características físico-químicas da atmosfera e comprometendo o equilíbrio natural da biosfera e da qualidade de vida no Planeta (SANTOS;JUNIOR, 2013). Segundo a Organização das Nações Unidas (2022), isso pode ser chamado de Mudanças Climáticas, que se caracteriza como “transformações a longo prazo nos padrões de temperatura e clima”.

O efeito estufa existe há bilhões de anos, possibilitando a vida terrestre na forma conhecida. O calor irradiado pela Terra se dirige ao espaço, porém parte dele é aprisionado na atmosfera, devido a presença dos gases causadores do efeito estufa. A temperatura média global da superfície da Terra com a presença do efeito estufa é de 15 °C, caso não existisse o efeito estufa natural, a temperatura média da superfície da Terra seria -18 °C (CAMPOS, 2001).

Sendo assim, o efeito de estufa consiste no aquecimento da superfície do planeta devido à presença de uma atmosfera constituída por gases que absorvem e emitem a radiação infravermelha (REIS, 2013). Consiste no aumento da temperatura média da superfície terrestre de 1º a 3,5º Celsius e aumento do nível médio do mar de 15 a 90 cm, previstos até 2100. (SENADO FEDERAL, 2004). Além disso, as graves mudanças climáticas advindas dessa fenomenologia resultam também no derretimento das geleiras e perda da biodiversidade (LINARD; AQUINO, 2015).

Os gases de efeito estufa que são considerados no Protocolo de Quioto são o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ) e as famílias dos perfluorcarbonos (compostos completamente fluorados, em especial perfluormetano  $\text{CF}_4$  e perfluoretano  $\text{C}_2\text{F}_6$ ) e hidrofluorcarbonos (HFCs) (SENADO FEDERAL, 2004).

Com relação aos níveis pré- industriais, o aumento da concentração do  $\text{CO}_2$ , de cerca de 280ppm para cerca de 387ppm, nos dias de hoje, fez com que 60% do aquecimento global fosse atribuído ao aumento da concentração desse gás na atmosfera, sendo considerado o principal responsável pelo aumento do efeito estufa (REIS, 2013). Apesar disso, é de ser o principal gás emitido por atividades antrópicas, a partir de eletricidade e aquecimento; agricultura; silvicultura; e uso do solo, o potencial destrutivo do metano são 24 vezes maior do que o do  $\text{CO}_2$  (VITAL, 2018). Por sua vez, apesar do óxido nitroso e dos clorofluorcarbonos (CFCs) terem poder calorífico que chegam a ser de 310 a 7.100 vezes maior do que o do  $\text{CO}_2$ , estes possuem baixíssimos níveis de emissão em comparação ao dióxido de carbono (MACHADO, 2019).

Assim, de acordo com Oliveira (2013) criou-se a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), onde no Artigo 2 diz que tem como objetivo final a:

estabilização dos gases do efeito estufa em um nível no qual a atividade humana não interfira com o sistema climático, ou no qual, as mudanças no clima ocorram lentamente de modo a permitir a adaptação dos ecossistemas, além de assegurar que a produção de alimentos e que o desenvolvimento econômico sigam de uma maneira sustentável.

A fim de evitar que a temperatura da terra se eleve mais de  $2^\circ\text{C}$ , em relação aos níveis pré-industriais, até 2050, 189 países acordaram definir metas individuais de redução de  $\text{CO}_2$ , segundo Vital(2018). Além disso, o autor afirma que a comunidade científica prevê elevação na temperatura do planeta entre  $2^\circ\text{C}$  e  $5^\circ\text{C}$ , caso as nações prossigam na atual trajetória de emissões de GEE, podendo gerar danos irreversíveis à biodiversidade, a agricultura, a indústria e a infraestrutura, como consequência de desastres naturais, prejudicando o desenvolvimento econômico dos países.

Existem diversas formas de diminuir o aquecimento global, tais como: preferir o uso de biocombustíveis (como etanol e biodiesel) a combustíveis fósseis (gasolina,

óleo diesel); incentivar o uso de energias renováveis não convencionais (solar, eólica, biomassa e hidrelétricas); investir na redução do consumo de energia e na eficiência energética; reduzir, reaproveitar e reciclar materiais; investir em tecnologias de baixo carbono; entre outros.

Uma vez que a disposição final de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários é um fator de grande relevância na emissão dos gases estufa, como mencionado anteriormente, em decorrência da decomposição anaeróbia dos resíduos ter como produto final o dióxido de carbono e o gás metano, além de outros gases, é essencial a implementação de tecnologias visando o alcance das metas de diminuição dessas emissões.

## 2.2 Aterros sanitários

Segundo a NBR 8.419/1992, emanada da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), aterro sanitário é:

Aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, consiste na técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza os princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário (1992, p. 62).

Figura 1: Aterro Sanitário



Fonte: IPT (2000)

A Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelece em seu Artigo 3º, XVI, a definição de resíduos sólidos sendo:

material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como 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.

Contudo, no Brasil os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU's) apresentam a seguinte destinação final: 27,7% em aterros sanitários, 22,5% em aterros controlados e 50,8% em vazadouros a céu aberto (lixões)(IBGE, 2010).

De acordo com o Senado, lixões são “depósitos a céu aberto que contaminam o ar, o solo e o subsolo e põem em risco o meio ambiente e a saúde da população” e, apesar de terem sido proibidos desde 2014, por meio da Política Nacional de Resíduos Sólidos, dados da Associação Brasileira de Tratamento de Resíduos e Afluentes - Abtre (2021), afirmam que o Brasil ainda conta com mais de 2.000 lixões.

De acordo com Linard (2013), aterros sanitários são a forma apropriada para disposição dos resíduos, pois atendem a normas técnicas de engenharia e a legislações que visam à redução dos impactos ao meio ambiente. Em lixões, aterros controlados e sanitários, os resíduos sólidos, em virtude de processos de decomposição da sua parcela orgânica, lançam na atmosfera o biogás.

Como consequência da disposição desse lixo nos aterros, tem-se a decomposição anaeróbia da matéria orgânica que tem como produto a emissão, principalmente, do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e do metano (CH<sub>4</sub>) para a atmosfera.

De acordo com Melo (2019), os gases componentes do biogás, chamados de Gases do Efeito Estufa, gerados a partir da degradação dos resíduos sólidos, podem absorver temporariamente a luz infravermelha térmica (radiação solar), provocando o aquecimento adicional da superfície e do ar.

O interior do aterro deve dispor de um sistema de drenagem de gases que possibilite a coleta do gás metano, do gás carbônico, da água (vapor), entre outros, formados pela decomposição do lixo (PORTELLA, 2014).

De acordo com o Art. 15, IV, da Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 (Brasil, 2010), o Plano Nacional de Resíduos Sólidos deve ter como conteúdo “metas para o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos”.

## **2.3 ENERGIA**

As emissões dos gases estufa pelo setor de energia cresceram 114%, do ano de 1990 até 2019, se caracterizando como o setor com maior aumento de emissões do país (SEEG, 2020).

A utilização de energia é responsável por cerca de 60% de todas as emissões de gases com efeito de estufa (REIS, 2013), o setor de transporte é responsável por cerca de 47% das emissões, sendo seguido pelos setores de energia industrial e produção de combustível (SEEG, 2020).

O desenvolvimento e a implementação de novas tecnologias com potencial de mitigação é um ponto extremamente importante para se conseguir uma economia de baixas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A energia nuclear, as energias renováveis (biocombustíveis) e a captura e armazenamento de carbono são algumas das promissoras possibilidades tecnológicas para o setor energético (REIS, 2013).

As energias renováveis representaram 19 % do total de energia final a nível mundial em 2012, destes, 9,3 % representa a biomassa tradicional e os outros 9,7 % distribuídos pela eólica, solar, hídrica, geotérmica e combustíveis (BORGES; SILVA; ALVEZ; TORRES, 2016).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética –EPE (2015), as energias geradas a partir de fontes não renováveis são aquelas que se caracterizam como esgotáveis e finitas, pois o processo de resiliência delas na natureza é bastante longo. Já as energias renováveis, são aquelas que são provenientes de fontes inesgotáveis e que emitem menos ou nenhum gás que prejudique a atmosfera do planeta.

A Câmara de Comercialização de Energia elétrica (CEE), caracteriza como energias não renováveis o gás natural, o petróleo e o carvão; e as energias renováveis a hidráulica, biomassa, eólica, solar, geotérmica, marítima, biogás, entre outras.

É importante destacar que, ainda segundo a CEE, a energia proveniente da biomassa é todo recurso renovável proveniente da matéria orgânica de origem animal ou vegetal, que possa ser utilizada na produção de energia; e o Biogás é obtido a partir da biomassa existente em dejetos urbanos, industriais e agropecuário, que passa naturalmente do estado sólido para o gasoso por meio da ação de microorganismos que decompõem a matéria orgânica em um ambiente anaeróbico, sendo lançado na atmosfera e contribuindo com o aquecimento global.

De acordo com o Planejamento e Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2020), o Brasil tem 83% de sua matriz elétrica originada de fontes renováveis, até este ano. Considerando os 07 tipos de energia renováveis que se tem, a hidrelétrica detém 63,8% do percentual total, sendo seguida pela eólica com 9,3%, biomassa e biogás com 8,9% e por fim a energia solar com 1,4%.

O aproveitamento de biomassa para produção de energia vem despertando cada vez mais interesse no Brasil, pois além de ser considerada uma fonte sustentável de baixo custo e abundante, existe a grande possibilidade de novas tecnologias para aumento do seu potencial energético (BORGES; SILVA; ALVEZ; TORRES, 2016).

Sendo assim, o biogás se mostra como uma solução, em energia renovável, a ser melhor estudada e utilizada como forma de diminuir as emissões dos gases para a atmosfera.

## **2.4 Biogás**

Dentre as fontes alternativas em evidência, o Biogás surge como uma grande potencialidade nacional e, além de sua vantagem da aplicação final como substituinte do combustível fóssil, apresenta a vantagem tanto da redução da emissão de metano produzido a partir da digestão anaeróbica de rejeitos urbanos e industriais, conforme ocorre nos aterros, como também a redução da emissão de dióxido de carbono quando na sua fase de purificação. (BORSCHIVER; SILVA, 2014).

O biogás é uma fonte renovável e alternativa de energia, podendo ser aproveitado na geração de energia elétrica, térmica e veicular (LINS; MITO; FERNANDES, 2015). É um biocombustível alternativo produzido a partir da digestão anaeróbia de biomassa (dejetos orgânicos) (MAGALHÃES; SOUZA; AFONSO;

RICIERI, 2004). No processo de digestão anaeróbia ocorre a degradação de matéria orgânica pela ação de diversos microorganismos na ausência de oxigênio livre. É um processo complexo e natural que pode ser dividido em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (SCHULTZ; SOARES, 2014).

“A composição do biogás está diretamente relacionada ao tipo e a composição do substrato, por este motivo há variação na composição do biogás de diferentes tipos de biomassa residual” (LINS; MITO; FERNANDES, 2015).

Além disso, como mistura variável de diferentes gases, tem poder calorífico e densidade variando com a concentração relativa de cada um dos constituintes (MAGALHÃES; SOUZA; AFONSO; RICIERI, 2004). Os principais constituintes do biogás são o metano (CH<sub>4</sub>) de 50% a 75% e o dióxido de carbono de (CO<sub>2</sub>) de 25% a 40%. Outros gases como o sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), o nitrogênio (N<sub>2</sub>), o hidrogênio (H<sub>2</sub>) e o monóxido de carbono (CO), estão também presentes na mistura, embora em quantidades bastante reduzidas (PINHEIRO, 1999).

Devido a presença do metano, esse gás incolor possui um poder calorífico que varia entre 5.000 a 7.000 kcal/m<sup>3</sup> e por isso é altamente combustível (SILVA, 2009; THRÄN et al, 2014; WELLINGER e LINDBERG, 2006; PERSSON e WELLINGER, 2006). Em decorrência da decomposição do biogás ser de 50% a 70% do total dos gases emitidos, o dióxido de carbono ainda se faz presente com em média 25% (BNDES, 2018), o que tende a diminuir o poder calorífico do metano e assim comprometer a sua qualidade quando usado como fonte de energia. (THRÄN et al, 2014; WELLINGER e LINDBERG, 2006).

As principais fontes de produção de biogás no Brasil são 51% a partir dos aterros sanitários, 25% da indústria de alimentos e bebidas, 14% da suinocultura e 6% de lodo de esgoto (EPE, 2015)

#### **2.4.1 Biogás de Aterro**

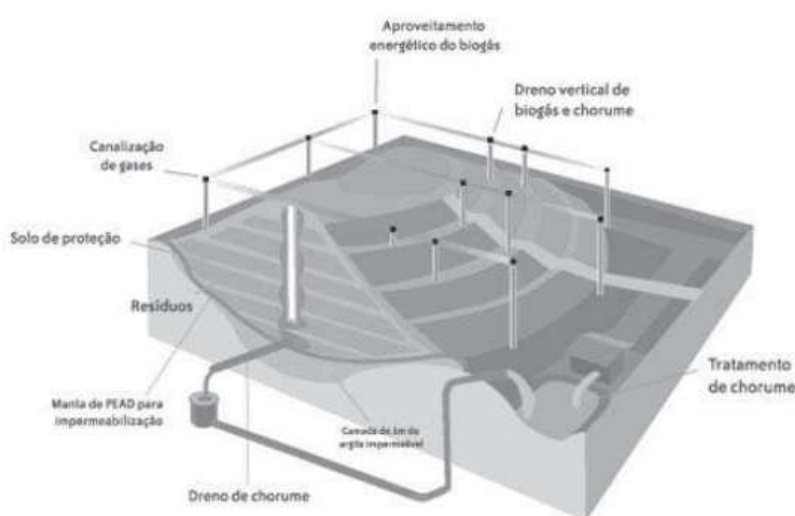
Como bem explicita Jucá (2009), “as emissões fugitivas de biogás em áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU) são um grave problema de poluição atmosférica de nível local e global que precisa ser mitigado”.

A aplicação do biogás depende da origem de produção, e a maior fonte se encontra nos aterros sanitários, biodigestores e poços de petróleo. Os biodigestores e os

aterros se destacam no aproveitamento estratégico pois são locais de fácil acesso, possuem grandes volumes de resíduos, e são condicionados a decomposição da matéria orgânica (PERSSON; WELLINGER, 2006; PETERSSON; WELLINGER, 2009).

Quando purificado, o biogás apresenta os mesmos padrões do gás natural fóssil e mostra-se como um potencial combustível para a geração de energia. (MIYAWAKI, 2014).

**Figura 2: Sistema esquemático do biogás no aterro.**



Fonte: Fundamentos BNDES (2007).

Além da energia elétrica, o biogás pode ser utilizado em todas as aplicações destinadas ao gás natural. Mas, nem todos os dispositivos utilizam os mesmos padrões de gás, desta forma, a remoção de certos componentes do biogás, faz-se necessária (AD-NETT, 2002).

As tecnologias usadas para a purificação tem o objetivo de padronizar o gás, adequar requerimentos legislativos e aumentar o poder calorífico a partir do aumento da concentração de metano. Dentre os métodos utilizados na atualidade, encontram-se o de purificação por membranas, purificação criogênica, purificação biológica, por água ou enzimas, lavagem de gás, absorção, adsorção e por pressão alternada (PINHEIRO, 2015).



## 2.5 Mecanismos de purificação de gás

A emissão de gases poluentes, como dióxido de carbono e metano, pelo uso intenso de fontes de origem fóssil contribui para o alerta global em relação a mudanças climáticas e seus efeitos. De acordo com os especialistas das Nações Unidas (ONU), a concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera da Terra é a maior em pelo menos 800 mil anos (IPCC, 2013).

De modo a contornar a crise atual, a utilização de fontes renováveis se mostra uma opção promissora, principalmente quando se tratando do aproveitamento energético do biogás. Contudo, para este aproveitamento ser viável, após a digestão anaeróbica se faz necessária uma etapa de purificação (BORSCHIVER & SILVA, 2014).

Os principais componentes a serem removidos do biogás são: água, ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (AD-NETT, 2002).

O vapor do biogás se combina com o sulfeto de hidrogênio gerando o ácido sulfídrico, que causa corrosão nos motores utilizados na geração de energia térmica e/ou elétrica a partir do biogás, bem como em tubulações e dutos de exaustão, entre outros equipamentos (SCHULTZ, SOARES, 2014). Existem várias técnicas que podem ser empregadas para remoção do H<sub>2</sub>S, como absorção em soluções químicas, adsorção sobre sólidos adsorventes, adição de sais/óxidos de ferro no biodigestor e remoção biológica (ABATZOGLOU; BOIVIN, 2009; RYCKEBOSCH et al., 2011). Contudo, após essa retirada, o biogás ainda apresenta alta concentração de CO<sub>2</sub>, um gás que reduz o poder calorífico do biogás (BARBOSA, 2018).

O metano, por sua vez, é um gás incolor e inodoro, possui pouca solubilidade na água e, quando adicionado ao ar torna-se altamente explosivo. Além disso, é um gás que torna o biogás mais capacitado para ser usado como energia renovável (COOK, 2016).

Para se conseguir um biogás livre de impurezas, são utilizadas diversas técnicas de purificação como as que serão apresentadas a seguir, que resume os parâmetros mais importantes das tecnologias de purificação do biogás listadas na literatura (MIYAWAKI, 2014).

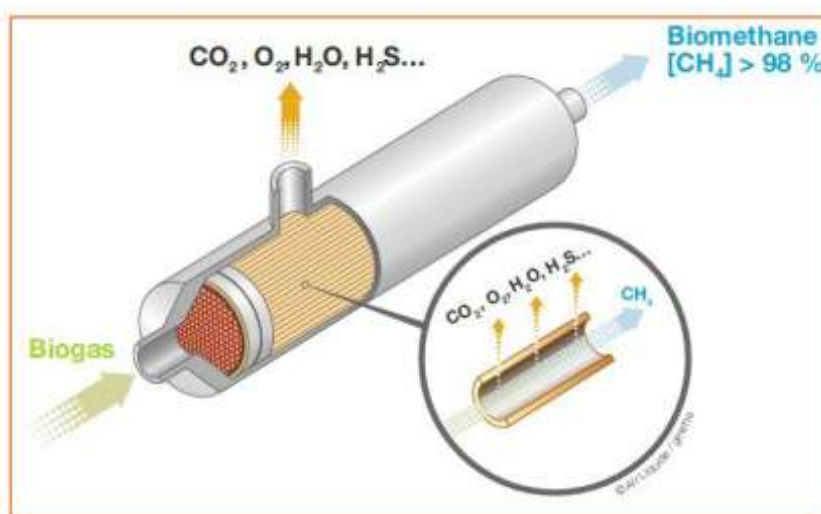
a) Purificação por membrana:

As membranas de permeação eram constantemente usadas para o tratamento do gás natural, tendo em vista que o biogás é constituído pelos mesmos gases deste e quando purificado tem as mesmas propriedades, foi possível utilizar essa técnica também para a purificação do biogás (MIYAWAKI, 2014).

A purificação de biogás com membranas ocorre devido à diferença do tamanho das partículas, sendo a diferença de pressão parcial entre os gases a força motriz por trás deste processo. Sendo assim, o processo de purificação por membranas ocorre devido a separação do metano e demais componentes do gás, com base nas diferentes velocidades de difusão que as moléculas do biogás apresentam em função do seu tamanho. A molécula de metano é menor que as demais, e se difunde mais rapidamente pela maioria das membranas quando comparada ao dióxido de carbono (SPILLMAN, 1989). Uma desvantagem desta técnica é a presença de resíduos finais com concentrações de  $\text{CH}_4$ , mas parte disso pode ser alimentado novamente para o sistema ou ser queimado em motores e geradores (MIYAWAKI, 2014). As vantagens dessa técnica se dão pois ela é segura, simples de se operar, de fácil manutenção e ainda não há a geração de produtos químicos perigosos.

E além da técnica por diferença de tamanho e velocidade da molécula, ainda existe a de separação por alta pressão, o qual separa o dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio e é realizado em três fases produzindo biometano com 96% de pureza (BORSCHIVER & SILVA, 2014).

**Figura 3: Processo de purificação do biogás por membranas.**



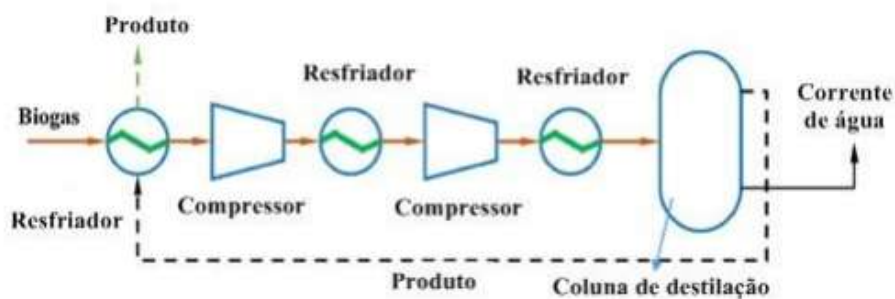
Fonte: Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.

b) Purificação criogênica:

Nesse método, o dióxido de carbono pode ser separado do metano pela perda de calor da mistura do biogás a pressão elevada. O biogás bruto é comprimido a cerca de 80 bar e a purificação feita em vários estágios.

De início, o gás comprimido é seco para evitar o congelamento no processo de refrigeração. Em seguida é resfriado a  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  e o dióxido de carbono condensado é removido num separador de gases. O dióxido de carbono é processado para recuperar o metano dissolvido, que é reciclado na entrada de gás (HAGEN e POLMAN, 2001). A principal desvantagem da separação criogênica é a exigência do uso de vários equipamentos e dispositivos, como: turbinas; compressores; permutadores de calor e colunas de destilação, tornando esta técnica de alto custo de capital, pois eles precisam de manutenção. Apesar disso, se for necessária a separação de uma grande quantidade de biogás esta técnica torna-se economicamente viável (DE HULLU et al., 2008).

**Figura 4: Fluxograma do processo de purificação do biogás por criogenia.**



Fonte: Avaliação teórica de diferentes processos de purificação de biogás.

c) Purificação biológica de dióxido de carbono:

Este método de purificação é a partir da fixação de  $\text{CO}_2$  por meio da fotossíntese. A conversão do carbono inorgânico em compostos orgânicos é realizada pelo processo de fotossíntese, dividida em duas fases. Uma fase luminosa (dependente da luz) e outra fase escura (independente da luz). Na fotossíntese, a célula utiliza a energia do sol para oxidar a água e, assim, produzir oxigênio e reduzir o  $\text{CO}_2$ , produzindo compostos orgânicos (MIYAWAKI, 2014).

A fixação biológica de  $\text{CO}_2$  pode ser efetuada por plantas e microrganismos fotossintéticos como as microalgas. As microalgas apresentam cerca de 50% de

carbono na sua constituição celular, e grande parte deste carbono é proveniente do ar (MATA et al., 2010).

d) Lavagem de gás:

Um dos métodos mais simples e mais econômicos envolve a utilização de água pressurizada como um absorvente. O biogás bruto é comprimido e alimentado em uma coluna de leito fixo e a água pressurizada é pulverizada contracorrente a partir do topo. Desta forma, o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{H}_2\text{S}$  dissolvem-se na água e são descartados posteriormente. A água pode ser reciclada através de uma torre de regeneração.

Uma desvantagem importante a ser observada é que nesse processo o  $\text{CO}_2$  presente na água após a purificação é descartado na atmosfera (MIYAWAKI, 2014).

A lavagem de gás apesar de ser a mais simples e barata, tem como produto final o despejo do dióxido de carbono na atmosfera, contribuindo para o efeito estufa, como bem pontuado pelos autores do livro (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019), quando explicita que “Após a descompressão e a dessorção, o  $\text{CO}_2$  é liberado para a atmosfera e a água é regenerada. Esta tecnologia simples de baixo custo resulta em uma remoção eficiente (95%) de  $\text{CO}_2$ ”.

e) Absorção:

O princípio deste processo é a baixa solubilidade do metano quando comparado com o dióxido de carbono. Neste sistema, o biogás encontra com um fluxo de líquido em uma coluna que é preenchida com um “recheio” de material plástico, de forma que o líquido retém alta concentração de dióxido de carbono, enquanto o gás tem sua concentração de metano aumentando. Existem três tipos de tecnologias de absorção que diferem pelo tipo de absorvente utilizado:

- Lavagem com água: o dióxido de carbono é mais solúvel em água que o metano, particularmente em baixas temperaturas e altas pressões. Diferentemente do processo de adsorção de balanço de pressão não é requerida uma etapa preliminar de limpeza do gás. Todavia, outras moléculas como  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{NH}_3$  podem ser absorvidas em paralelo, sendo que o  $\text{H}_2\text{S}$  necessariamente deve ser removido do gás de saída.

- Lavagem física com solvente orgânico: Este processo é similar à lavagem com água e também envolve interações físicas. Neste caso, o agente absorvente consiste em um reagente orgânico. Como na lavagem com água,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$  e  $\text{H}_2\text{O}$  também podem ser removidos, mas deve ser antes desta etapa de ajuste de poder calorífico.

- Lavagem química: Este método é similar aos outros descritos anteriormente, porém usa solventes baseados em aminas (BORSCHIVER; SILVA, 2014).

f) Purificação por adsorção:

Amplamente utilizada em todo o mundo, neste processo de purificação o dióxido de carbono é removido do biogás por meio da adsorção com diferentes pressões. O sistema consiste de quatro recipientes cheios de material adsorvente. O biogás entra no fundo do reservatório, o material adsorvente fixa o CO<sub>2</sub> e ao final do processo se obtém o biogás purificado com concentrações de 95% (v/v) de CH<sub>4</sub> e eficiência de recuperação de metano no biogás de 85% (v/v) a 90% (v/v), dependendo do material adsorvente (MITARITEN, 2005).

De acordo com Magalhães et al. (2004), no processo de adsorção as colunas recheadas são muito utilizadas e são compostas por um casco cilíndrico, uma placa perfurada para suporte do recheio e distribuição do solvente. Além disso, o recheio, constituído de materiais como cerâmicas; carbono; aço e propileno, tem a função de promover uma maior superfície de contato entre o líquido e o gás, aumentando a taxa da absorção do sistema.

Quando o material adsorvente está completamente saturado com dióxido de carbono, o biogás passa para o reservatório seguinte, que foi previamente regenerado pela despressurização até a pressão atmosférica.

Após a remoção dos contaminantes, a pressão do sistema volta a baixar e assim ocorre a limpeza do material adsorvente.

Embora os adsorventes tenham boa capacidade de retenção de umidade, a necessidade de alta temperatura e pressão os tornam mais caros para os processos de purificação de biogás.

Podendo ser usado como fonte de energia para aquecimento e movimentação mecânica nas instalações rurais, diminuindo os custos na propriedade e evitando o descarte impróprio de resíduos, o biogás se mostra capaz de ter inúmeras aplicações (ALVES, 1980). Cada 1m<sup>3</sup> de biogás equivale a 0,61 litros de gasolina; 0,55 litros de biodiesel; 0,45kg de GLP (gás liquefeito de petróleo); e 0,9 kWh de eletricidade (SILVA, 2009).

Neste sentido, diversas tecnologias são capazes de efetuar a conversão energética ou utilização do biogás. A energia química contida nas moléculas do biogás é convertida em energia mecânica através da combustão, essa energia

mecânica é então convertida em energia elétrica com a utilização de um gerador. No entanto, o biogás também pode ser usado na produção de calor, o qual pode ser utilizado no aquecimento de, por exemplo, caldeiras para qualquer tipo de processo industrial que utilize ou necessite de água a altas temperaturas ou vapor d'água. Bem como a utilização do biogás nas células a combustível. Por isso, atualmente, as turbinas a gás e os motores de combustão interna, são as tecnologias mais utilizadas para o aproveitamento energético do biogás (SANTOS,2000).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

O desenvolvimento dos ensaios de laboratório teve a finalidade de avaliar, as modificações físicas ocorridas em um meio poroso submetido à injeção de CO<sub>2</sub>, executada através do ensaio de injeção de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> no reator de inox.

#### **3.1 Ensaio de injeção de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> com reator de inox**

Para a realização dos ensaios de injeção de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>) foi necessário instrumentar e adaptar uma célula de inox com capacidade de controlar temperatura e pressão adequadas para a especificidade do assunto em estudo. Neste sentido, no laboratório de instrumentação e solos da Universidade Federal de Pernambuco foi adaptado um reator de aço inoxidável AISI 304 com volume de 250 ml que permite o contato direto da rocha com fluidos gasosos. Este reator foi instrumentado com um manômetro e sistema de controle automático de temperatura (Figura 1).

**Figura 5: Manômetro de controle de pressão (a); Caixa de controle de temperatura (b); Reator de inox (c).**



As amostras do meio poroso utilizadas nesta pesquisa constitui-se um carbonato sintético e, foram produzidas na Universidade Federal de Pernambuco, com parâmetros físicos e de resistência conhecidos com base na pesquisa de Melo (2012) e Galindo (2016), para melhor poder avaliar o seu comportamento após a interação com os fluidos gasosos, medidos a partir dos equipamentos Geotech Biogás 5.000 e DragerX-am 7.000.

O Geotech Biogás5.000 é um analisador portátil de gases de aterro e solos, com medições disponíveis para CH<sub>4</sub> (0-100%), CO<sub>2</sub> (0-100%) e O<sub>2</sub> (0-25%), de H<sub>2</sub> (0-1000ppm e CO, além de ser um equipamento de fácil operação, calibragem e baixo custo de manutenção que permite o estudo nas áreas de tratamento e produção de biogás. O DragerX-am 7.000 é a combinação de mais de 25 sensores para a detecção simultânea e contínua de até 5 gases, entre eles oxigênio, gases tóxicos e vapores combustíveis.

Foram realizados 03 (três) ensaios com pressão e temperatura controlados, no qual se pode comparar e analisar as diferenças ocorridas no meio poroso a partir da injeção de 40% de dióxido de carbono e 60% de metano, sendo estes posteriormente analisados por diferentes equipamentos.

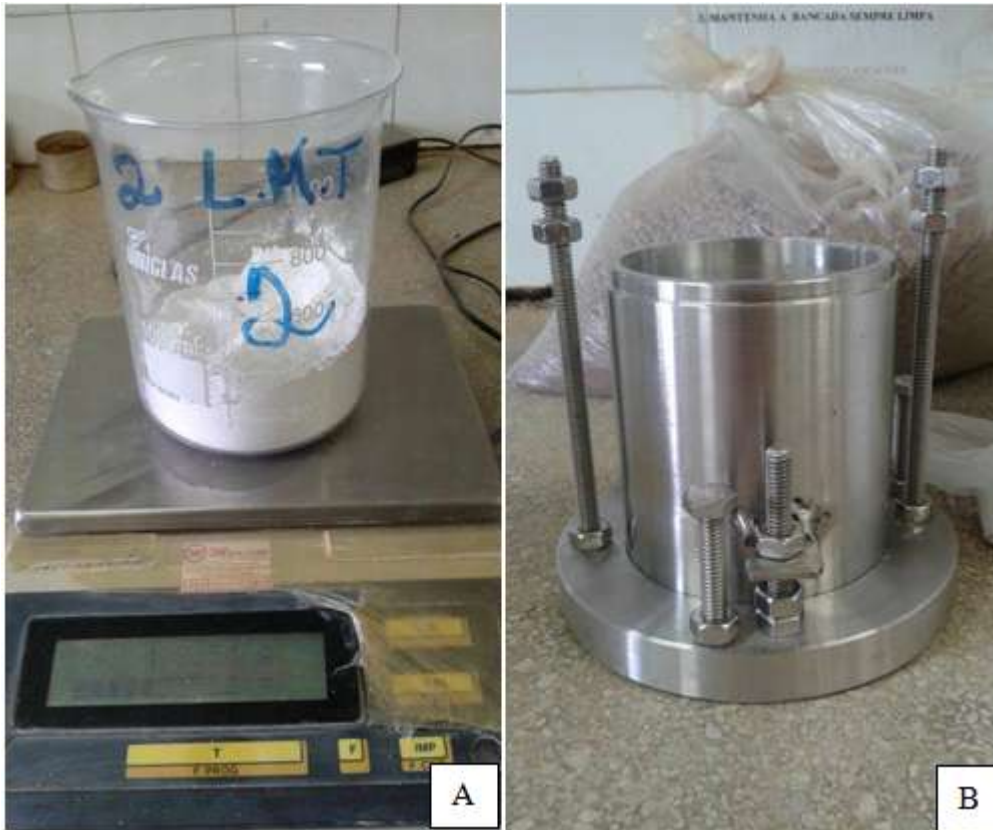
Para a realização dos três ensaios foi aplicada uma temperatura de 30 °C e uma pressão de 100 kpa para o Ensaio 01 e 200 kpa para os Ensaio 02 e 03. Além disso, para o Ensaio 03 inseriu-se 100ml de água para observar como a amostra se comportaria.

O meio poroso tem na sua composição Halimeda( $\text{CaCO}_3$ ), hidróxido de cálcio e areia quartzosa, e para sua preparação seguiu-se as seguintes etapas:

- Mistura dos materiais de composição do meio poroso (25% de Halimeda, 25% de hidróxido de cálcio e 50% de areia quartzosa) (Figura 2A);
- Colocação da mistura em uma célula de molde (Figura 2B);
- Para posterior compactação (Figura 2C);
- Em seguida o corpo de prova foi submetido à carbonatação durante o período de 5 minutos, para cimentação dos materiais (Figura 2D);
- Após esses procedimentos, colocou-se a célula com a amostra na estufa por um período de 24h e, finalmente extraiu a com a ajuda de um extrator mecânico (Figura 2E);
- Após a extração da amostra (Figura 2F) foi necessário lixá-la para que seu diâmetro (3,6 cm) (Figura 2G);
- Montagem do ensaio na célula de inox (Figura 2H);
- Mediu-se o percentual de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e do metano ( $\text{CH}_4$ ) antes (Figura 2I);
- Inseriu-se o fluxo de gases no reator ao qual a amostra foi inserida para a realização do ensaio (Figura 2J);
- E, por fim, mediu-se o percentual de gases depois do ensaio com o uso dos equipamentos geoteh, biogás 5.000 (Figura 2K), e drager (Figura 2L).



Figura 6: Mistura do material na célula de molde (A); Colocação da mistura em uma célula de molde (B); Compactação do meio poroso na prensa mecânica (C); Carbonatação da amostra (D) Extração da amostra em um extrator mecânico (E); Amostra bruta (F); Meio poroso lixado 3,6 cm (G); Montagem do ensaio na célula de inox (H); Medição do percentual de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> antes do ensaio (I); Inserção do fluxo de gases para início do ensaio (J); Equipamento utilizado para medir o percentual dos gases depois do ensaio: Geotech (K); Drager (L).











#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Ensaio 01 foi injetado o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o metano ( $\text{CH}_4$ ) em um reator com pressão de 100kpa e temperatura de 30°C. Além disso, mediu-se o peso do meio poroso antes e depois do ensaio, bem como o percentual de gases, para que fosse possível haver uma comparação, como descrito na tabela 01.

Tabela 01 – Ensaio 01 – Injeção de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  em reator com temperatura de 30 °C e pressão de 100kpa.

|                                     |                                      |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Temperatura<br>30 °C                | Pressão<br>100kpa                    |
| Peso do meio poroso antes<br>68,62g | Peso do meio poroso depois<br>69,57g |
| Equipamento: Geotech                |                                      |
| Antes do ensaio                     | Depois do ensaio                     |
| $\text{CH}_4$ : 58%                 | $\text{CH}_4$ : 46,9%                |
| $\text{CO}_2$ : 40,7%               | $\text{CO}_2$ : 0%                   |
| $\text{O}_2$ : 0,5%                 | $\text{O}_2$ : 14,6%                 |
| CO: 0ppm                            | CO: 81ppm                            |
| $\text{H}_2\text{S}$ : 3ppm         | $\text{H}_2\text{S}$ : 4ppm          |

Após a realização do primeiro ensaio, foi possível observar, a partir das medições dos percentuais de gases, que houve total retenção do percentual de  $\text{CO}_2$  pela amostra. O dado se confirma também quando se observa o aumento de massa da amostra em 0,95g, resultado da absorção total de  $\text{CO}_2$  e formação de precipitados. Já o aumento do  $\text{O}_2$  se deu, possivelmente, pela liberação do gás por meio dos poros da amostra ou pela contaminação da amostra gasosa com o ar atmosférico.

Neste ensaio também houve uma redução no teor de  $\text{CH}_4$ , podendo ser explicado pela perda do gás pra atmosfera, bem como pela possível entrada de  $\text{O}_2$  durante a medição.

Ao final deste experimento observou-se a necessidade de aumento da pressão no sistema para a obtenção de um maior volume de gás, de forma que fosse possível a análise dos gases a partir de mais de um equipamento. Sendo assim, considerou-se o resultado do Ensaio 01 variável.

Em vista disso, para a realização do Ensaio 02 se manteve a temperatura (30°C) e a pressão foi aumentada para 200kpa, de modo que ao término do ensaio se obtivesse gás suficiente para analisar as mudanças do meio gasoso usando tanto o equipamento Geotech como também o Drager, para efeito comparativo, a fim de se obter um resultado mais preciso e satisfatório, como demonstrado na tabela 02.

Tabela 02 – Ensaio 02 - Injeção de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> em reator com temperatura de 30 °C e pressão de 200kpa.

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| Temperatura<br>30 °C                  | Pressão<br>200kpa                      |
| Peso do meio poroso antes<br>63,4684g | Peso do meio poroso depois<br>64,1373g |
| Equipamento: Geotech                  |  |
| Antes do ensaio                       | Depois do ensaio                       |
| CH <sub>4</sub> : 58%                 | CH <sub>4</sub> : 59,3%                |
| CO <sub>2</sub> : 40,7%               | CO <sub>2</sub> : 0%                   |
| O <sub>2</sub> : 0,5%                 | O <sub>2</sub> : 6,7%                  |
| CO: 0ppm                              | CO: 316ppm                             |
| H <sub>2</sub> S: 3ppm                | H <sub>2</sub> S: 18ppm                |
| Equipamento: Drager                   |  |
| Antes do ensaio                       | Depois do ensaio                       |
| CH <sub>4</sub> : 63%                 | CH <sub>4</sub> : 61%                  |
| CO <sub>2</sub> : 37%                 | CO <sub>2</sub> : 0%                   |
| O <sub>2</sub> : 0%                   | O <sub>2</sub> : 6,7%                  |
| CO: 0ppm                              | CO: 37ppm                              |
| H <sub>2</sub> S: 0ppm                | H <sub>2</sub> S: 0ppm                 |

Como pôde ser observado,houve uma queda considerável do percentual de CO<sub>2</sub> medido após a realização do ensaio, chegando a 0%, e como consequência disso também se pôde perceber o aumento de 1,3% no percentual de CH<sub>4</sub>.

Pode-se observar também um aumento no percentual de O<sub>2</sub> existente no experimento, decorrente da liberação desse gás através dos poros da amostra ou por alguma contaminação ocorrida durante a realização do ensaio.

Além disso, houve alteração do peso do meio poroso, visto que este reteve os gases ali presentes, tendo sido aumentado em 0,668g se comparado ao seu peso ao início do experimento. Dessa forma, o experimento se comportou de acordo com o esperado, uma vez que houve absorção do CO<sub>2</sub> na amostra.

A partir da análise do Ensaio 02, foi possível confirmar os dados obtidos no primeiro experimento, de modo que a medição apenas por um equipamento não interferiu no resultado, já que se alcançou o mesmo comportamento se comparado ao segundo.

Para realizar o terceiro experimento foi mantida a temperatura de 30°C e a pressão de 200kpa, além de ser acrescentado 100ml de água, com o intuito de se observar como o meio poroso e o CH<sub>4</sub> se comportariam, também quanto a solubilização, quando imerso a esta.

Os resultados encontrados se assemelharam aos dois encontrados anteriormente, como demonstrados na Tabela 03.

Tabela 03 – Ensaio 03 – Injeção de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> em reator com temperatura de 30 °C, pressão de 200kpa e adicional de 100ml de água.

|                                       |                   |                                       |
|---------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| Temperatura<br>30 °C                  | Pressão<br>200kpa | Água<br>100ml                         |
| Peso do meio poroso antes<br>64,9120g |                   | Peso do meio poroso depois<br>77,784g |
| Equipamento: Geotech                  |                   |                                       |
| Antes do ensaio                       |                   | Depois do ensaio                      |
| CH <sub>4</sub> : 58%                 |                   | CH <sub>4</sub> : 52,9%               |
| CO <sub>2</sub> : 40,7%               |                   | CO <sub>2</sub> : 2,5%                |
| O <sub>2</sub> : 0,5%                 |                   | O <sub>2</sub> : 7,9%                 |
| CO: 0ppm                              |                   | CO: 352ppm                            |
| H <sub>2</sub> S: 3ppm                |                   | H <sub>2</sub> S: 19ppm               |
| Equipamento: Drager                   |                   |                                       |
| Antes do ensaio                       |                   | Depois do ensaio                      |
| CH <sub>4</sub> : 76%                 |                   | CH <sub>4</sub> : 52%                 |
| CO <sub>2</sub> : 44%                 |                   | CO <sub>2</sub> : 1,8%                |
| O <sub>2</sub> : 0%                   |                   | O <sub>2</sub> : 8,7%                 |
| CO: 0ppm                              |                   | CO: 38ppm                             |
| H <sub>2</sub> S: 0ppm                |                   | H <sub>2</sub> S: 0ppm                |

Ao final do terceiro ensaio foi identificada a retenção total do CO<sub>2</sub> existente no meio poroso e a diminuição em 24% do percentual de CH<sub>4</sub>, devido a uma possível contaminação da amostra por O<sub>2</sub>.

Como possível resultado da liberação do O<sub>2</sub> pelos poros da amostra ou por imprecisão do equipamento, reforçando o resultado do Ensaio anterior, que teve o

aumento de 6,7%, pode-se observar o aumento de 8,7% no percentual desse gás ao final do Ensaio 03. Além disso, o meio poroso também foi capaz de reter 100% da água inserida anteriormente.

Houve o aumento considerável da massa da amostra em 12,872g, visto que a existência de água favoreceu bastante a formação de precipitados, fazendo com que a amostra retivesse os gases e o líquido existente no experimento.

Dessa forma pode-se confirmar também que os resultados esperados foram alcançados e confirmados ao serem analisados e comparados aos resultados observados nos Ensaios 01 e 02, no qual em ambos houve a retenção forçada total do CO<sub>2</sub>.

Observa-se, então, que o meio poroso, por ter a capacidade de armazenar o dióxido de carbono, tem o potencial de manter ou aumentar o poder calorífico do biogás, visto que é capaz de reter esse gás de modo que seja possível purificar o biogás para usá-lo como uma fonte de energia alternativa, bem como armazenar o CO<sub>2</sub> para a diminuição da emissão dos gases do efeito estufa.

O meio poroso utilizado para a realização do experimento também está sendo estudado e obteve resultados satisfatórios em diversas outras pesquisas que objetivaram o armazenamento do dióxido de carbono, como bem explicitado por GALINDO (2019) em seu artigo intitulado "Hydro-mechanic behavior of synthetic carbonate rocks subjected to injection of a reactive fluid" que analisa as modificações deste mesmo meio poroso, produzido em laboratório, quando submetido a fluidos que seriam possivelmente encontrados ao serem utilizadas para o armazenamento geológico do CO<sub>2</sub>, chegando a conclusão de que a rocha pode ser utilizada para tal fim.

LINS (2012), por sua vez, em seu artigo intitulado "Análise da injeção de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em rochas carbonáticas", utiliza de corpos de provas naturais com as mesmas propriedades deste produzido em laboratório e conclui que "A partir dos resultados de ensaios com diferentes tempos de contato é possível avaliar as modificações no meio poroso e constatar a viabilidade do armazenamento de CO<sub>2</sub> neste tipo de rocha."



## 5 CONCLUSÃO

Ao desenvolver experimentos de laboratório para estudo de tratamento de biogás, a partir dos ensaios de injeção de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ) em um meio poroso construído em laboratório e submetido a condições de diferentes temperatura e pressão, bem como a injeção de água, por meio de um reator controlado, pode-se analisar que estes obtiveram sucesso em seus resultados e alcançaram o objetivo inicial da pesquisa, absorvendo e armazenando o  $\text{CO}_2$  injetado, além de remover o gás carbônico melhorando a qualidade do biogás.

Desta forma, a composição do meio poroso, constituído de halimeda ( $\text{CaCO}_3$ ), hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e areia quartzosa, submetidos a carbonatação, foi realizada com sucesso quando ao final do experimento pôde-se concluir que houve um aumento do peso final do corpo de prova, de modo que este pode ser um mecanismo utilizado para a retenção do biogás pois tem capacidade de armazenamento e retenção forçada do gás e da água ao qual é submetido, dado observado quando ao início dos experimentos o percentual de  $\text{CO}_2$  existente era de 40%, e ao final chegou a zero. Além disso, ao remover o  $\text{CO}_2$ , se mostra uma grande alternativa para o tratamento e purificação do biogás, de modo que este possa ser utilizado como uma alternativa viável aos combustíveis fósseis, visto que é um biocombustível bastante eficaz.

Aliando-se a isso, os experimentos mostraram resultados eficazes quando provado que se mostra como uma maneira a contribuir para a diminuição da emissão dos gases do efeito estufa para a atmosfera por meio da retenção desses pela camada de cobertura nos aterros em situações de fissuras ou controle de emissões pontuais.

Tendo em vista a necessidade atual do armazenamento de  $\text{CO}_2$ , a realização da pesquisa é de suma importância para que se possa ter uma nova visão a respeito da purificação do biogás.

Com os resultados satisfatórios das análises feitas em todos os experimentos, constata-se que esse estudo pode se tornar uma inovadora tecnologia para o armazenamento do biogás, tanto para a vertente do tratamento deste como para a redução de emissões e estudos de armazenamento de  $\text{CO}_2$  na área de geomecânica e engenharia do petróleo.

## 6 REFERÊNCIAS

AGOSTINETTO, D. **Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado**. Ciência Rural, Santa Maria, 2002. v.32, 1073-1081 p.

ALVES, C.A.; CANTILLO-CASTRILLÓN, M.; BASTOS-NETO, M.; AZEVEDO, D.C.S. **Adsorção multicompetente de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> em carbono ativado para processos de purificação de biogás**. Universidade Federal do Ceará, 2015.

ALVES, S.M. **Biogás; uma alternativa de energia no meio rural**. EMBRAPA-CPATU, 1980.

ANDRIATTA, A.A. **Avaliação Teórica de diferentes processos de purificação de biogás**. Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2021.

BARBOSA, A.B. **Desafios do aproveitamento do biogás de aterro sanitário para uso energético**. Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2018.

BEEBE, N.W.; COOPER, R.D.; MOTTRAM, P.; SWEENEY, A.W. **Australia's dengue risk driven by human adaptation to climate change**. 2009.

BNDES – **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social**. Brasil, 2007.

BORGES, A.C.P.; SILVA, M.C.; ALVEZ, C.T.; TORRES, E.A.. **Energias renováveis: Uma contextualização da biomassa como fonte de energia**. Fortaleza, 2016. Revista Eletrônica do PRODEMA, v. 10, n. 2, p. 23-36. ISSN: 1982-5528

CAMPOS, C.P. **A conservação das florestas no Brasil, mudanças do clima e o mecanismo de desenvolvimento limpo do protocolo de quioto**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

CERVEIRA, G. S. **Remoção de CO<sub>2</sub> do biogás por permeação em membranas**. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e pesquisa de engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

CODOLO, M.C. **Avaliação teórica de diferentes processos de purificação de biogás**. Universidade Federal de São Paulo, 2021.

COOK, M. **Gás metano**. 2016.

FIRMO, A.L.B.; NUNES, C.F.; GALINDO, K.B.T.; SOUZA, D.B.; GUIMARÃES, L.J.N. **Estudo da interação rocha-fluido com ênfase no armazenamento de CO<sub>2</sub> em formações geológicas e tratamento de biogás de aterros**. Instituto Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2017. Revista CIENTEC Vol. 9, nº 2, 135-141.

FIRMO, A.L.B. **Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

GALINDO, K.B.T. **Comportamento hidro-mecânico de rochas carbonáticas sintéticas submetidas à injeção de um fluido reativo**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2016. 54 p.

GALINDO, K.B.T.; LIMA, A.; GUIMARÃES, L.J.N.; SILVA, K.C.L.; LINS, C.M.M.S. (2019). **Hydro-mechanic behavior of synthetic carbonate rocks subjected to injection of a reactive fluid**. American Rock Mechanics Association, Pernambuco, Brasil, 2019.

GOVERNO DO BRASIL. **Programa Lixão Zero reduziu em 17% a quantidade de lixões em 2020**. Disponível em: [Programa Lixão Zero reduziu em 17% a quantidade de lixões em 2020 — Português \(Brasil\) \(www.gov.br\)](http://www.gov.br). Acesso em: 10 de abril de 2022.

HAAS, L. **Desenvolvimento de um filtro para remoção de H<sub>2</sub>S de biogás**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) (2010). **Pesquisa nacional de saneamento básico**. Rio de Janeiro, 2010.

IPCC. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2005. 442 p.

IPT - Instituto de Pesquisa Tecnológica. **Manual de Gerenciamento Integrado. Lixo Municipal: 2. ed.** São Paulo, 2000. 29 p.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R.L.R.; AMARAL, A.C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Santa Catarina, 2019. ISBN 978-85-93823-01-5

LINARD, A.F.G; AQUINO, M.D. **Biogás de aterro sanitário: análise de duas medidas mitigadoras das mudanças climáticas sob a perspectiva do mecanismo de desenvolvimento limpo**. Revista DAE. DOI 10.4322/dae.2015.002, 2015.

Lins, C.M.M.S.; Melo, L.M.P.; Oliveira, A.D.; Firmo, A.L.B, Galindo K.B.T. **Analysis of the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) injection in carbonate rocks**. 2012. *Cientec*. v.4 (2), 84-91.

LINS, L.P.; MITO. J.YL.; FERNANDES, D.M. **Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa**. Rio de Janeiro, 2015.

MACHADO, J.R. **Estimativa das emissões de gases de efeito estufa de fontes móveis no jardim botânico do rio de janeiro**. Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2019.

MAGALHÃES, E.A.; SOUZA, S.N.M.; AFONSO, A.D.L.; RICIERI, R.P. **Confecção e avaliação de um sistema de remoção do CO<sub>2</sub> contido no biogás**. *Acta Scientiarum. Technology*, Paraná, Brasil, 2004.

MELO, G.C.B. **Estudo do potencial de geração elétrica através do biogás de aterro sanitário: um estudo de caso.** Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2010.

MELO, L. M. P. (2012). **Análise numérico-experimental de rochas carbonáticas sintéticas submetidas à injeção de um fluido reativo.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil, 2012. 77 p.

MEZZARI, M.P, SILVA, M.L.B. **Tratamento e purificação de biogás.** 2019. 89 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Efeito Estufa e Aquecimento Global.** Disponível em: [Efeito Estufa e Aquecimento Global \(mma.gov.br\)](http://mma.gov.br). Acesso em: 10 de abril de 2022.

MIYAWAKI, B. **Purificação de biogás através de cultivo de microalgas em resíduos agroindustriais.** Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

OLIVEIRA, I.C.P. **Sistema de Indicadores para identificação das principais fontes de emissão dos gases do efeito estufa nas cidades: uma proposta teórico-metodológica.** Tese de Doutorado, Pernambuco, Brasil, 2013.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **O que são as mudanças climáticas?**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/150491-o-que-sao-mudancas-climaticas>. Acesso em: 10 de abril de 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Relatório da ONU aponta recorde de emissões de gases de efeito estufa.** Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2022/04/1785102>. Acesso em: 19 de junho de 2022.

PINHEIRO, N. **Aproveitamento energético de gás de aterro para produção de energia utilizando membranas para purificação do biogás.** Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

PORTELLA, M.O; RIBEIRO. J.C.J. **Aterros sanitários: aspectos gerais e destino final dos resíduos.** Revista Direito Ambiental e sociedade. Minas Gerais, Brasil, 2014. 115-134 p.

REIS, C.V. **Emissões de CO<sub>2</sub> e aquecimento global desenvolvimento de tecnologias de captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2013.

SANTOS, P. **Guia técnico do Biogás.** Centro para a conservação de energia (CEE), Portugal, 2000.

SANTOS, E.L.B, JUNIOR. **Biogas Production from waste to animal.** Tekhne e Logos, São Paulo, Brasil, 2013. v.4, n.2. ISSN 2176 – 4808

SCHULTZ, E.L.; SOARES, I.P. **Reforma do biogás - revisão.** Circular técnica. Brasília, 2014. ISSN 2177-4420.

SENADO FEDERAL. **Protocolo de Quioto e legislação correlata**. Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas, Brasília, 2004. Volume III.

SILVA, C. **Limpeza e Purificação de Biogás**. Universidade de Trás-os-montes e Alto Douro, Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, 2009.

SILVA, R.P.A.. **O Brasil e o Regime Internacional de Mudanças Climáticas: Contribuições Nacionalmente Determinadas e o Acordo de Paris (COP 21)**. Pós-Graduação, Universidade de Brasília, Brasil, 2019.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG) (2020) **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019**, 2020. 8 p.

SOUZA, D.B. **Estudo do Comportamento físico-químico de rochas carbonáticas sob injeção de CO<sub>2</sub> supercrítico**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil, 2016.

VITAL, M.H.F. **Aquecimento Global: Acordos internacionais, emissões de CO<sub>2</sub> e o surgimento dos mercados de carbono no mundo**. Rio de Janeiro, Brasil, 2018. v. 24, n. 48, 167-244 p.