

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

REMOÇÃO DE CO₂ DE BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO EMPREGANDO COLUNA DE ABSORÇÃO COM SOLUÇÃO ALCALINA

* Marcelo Mendes Pedroza¹
Rui Felipe de Miranda Rios²
Matheus Gomes Arruda¹
Cláudia da Silva Aguiar Rezende¹
João Evangelista Marques Soares²

REMOVAL OF CO₂ FROM LANDFILL BIOGAS USING AN ABSORPTION COLUMN WITH ALKALINE SOLUTION

Recibido el 20 de agosto de 2022. Aceptado el 5 de enero de 2023

Abstract

The research aimed to evaluate the removal of CO₂ from biogas from the sanitary landfill in the municipality of Palmas – Tocantins. The flow measurement (weekly and daily profile) of the biogas was carried out through a vertical drain located in one of the cells of the Landfill. LPG Building gas measurement operation was carried out through the biofuel carried out from a gas meter. The biogas purification tests were carried out using a spray tower scrubber, using calcium hydroxide solutions to remove CO₂. The variable concentration of the alkaline solution was evaluated during the biogas purification tests. Samples were collected and analyzed using chromatographic techniques, before and after the biofuel purification system. The biogas flow profile equal to 18 m³/day indicates the possibility of application of this biofuel as an energy resource. During the tests of transformation of biogas into biomethane, using a washing column with alkaline solution, a methane content of 75% was obtained when calcium hydroxide solution with a concentration equal to 0.16 mol/L was used, which points to obtaining a better quality biofuel after a purification system, meeting the characteristics recommended by the National Petroleum Agency (ANP), for industrial application purposes.

Keywords: biofuels, biomethane, gas purification, renewable energy.

¹ Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN), Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Tocantins (IFTO), Palmas – Tocantins, Brasil.

² Laboratório de Energia Renovável da Universidade Federal do Tocantins (UFT), Palmas – Tocantins, Brasil.

* *Autor correspondente:* Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) no Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Tocantins (IFTO), Palmas – Tocantins, Brasil. 310 Sul, Av. LO 5, s/n - Plano Diretor Sul, Palmas – TO. CEP: 77021-090. Email: mendes@ifto.edu.br

Resumo

Essa pesquisa teve como objetivo avaliar a remoção de CO₂ do biogás oriundo do Aterro Sanitário de resíduos sólidos urbanos da cidade de Palmas - Tocantins, empregando um sistema lavador de gases de baixo custo com adição de aditivos na água de lavagem, submetidos a variações construtivas e operacionais. A medição de fluxo (semanal e perfil diário) do biogás foi realizada através de um dreno vertical localizado em uma das células do Aterro Sanitário. Foi empregado um medidor de gás GLP Predial para medir a vazão do biocombustível. Os testes de purificação do biogás foram realizados através de um lavador de gases, sendo empregado soluções de hidróxido de cálcio para a retirada do CO₂. Foi avaliada a variável concentração da solução alcalina durante os testes de purificação de biogás. As amostras foram coletadas e analisadas através de técnicas cromatográficas, antes e após o sistema de purificação do biocombustível. O perfil de vazão de biogás igual a 18 m³/dia indica uma possibilidade de aplicação desse biocombustível como recurso energético. Durante os testes de transformação de biogás em biometano, empregando coluna de lavagem com solução alcalina, foi obtido um teor de metano de 75% quando se empregou solução de hidróxido de cálcio com concentração igual a 0.16 mol/L, o que aponta para a obtenção de um biocombustível com uma melhor qualidade após sistema de purificação, atendendo as características preconizadas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), com fins de aplicação industrial.

Palavras-chave: biocombustíveis, biometano, purificação de gás, energia renovável.

Introdução

A intensificação das atividades humanas, principalmente com o uso de combustíveis fósseis, processos industriais, desmatamento de floresta e produção de resíduos sólidos urbanos, tem aumentado a concentração de gases na atmosfera, tais como o dióxido de carbono (CO₂) e o gás metano (CH₄), que são os principais gases responsáveis pelo efeito estufa. Porém, se comparado ao dióxido de carbono, o metano possui potencial de aquecimento global 21 vezes superior. O efeito conjunto de tais substâncias pode vir a causar um aumento da temperatura global estimado entre 2 e 6 °C nos próximos 100 anos (Marques, 2019).

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 45% de dióxido de carbono e 50% de metano. Compostos como o nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, carboidratos saturados, carboidratos halogenados, oxigênio e monóxido de carbono são constituintes que podem ser encontrados ao se analisar o biogás. O biogás é preocupante do ponto de vista local (odores e efeitos sobre a saúde), regional e global (efeito estufa) (Nizami, *et al.*, 2017).

Conforme Faria (2010), os gases gerados nos aterros sanitários, quando não capturados e conduzidos para queima em flares, para geração de energia elétrica ou mesmo para aquecimento de caldeiras, ainda são queimados em drenos verticais abertos, de maneira incipiente, lançando poluentes na atmosfera. A forte presença de gás metano nos gases de aterro é fator preponderante para incentivar o seu aproveitamento ou a adaptação para gás natural, considerando que se trata de uma alternativa sustentável e renovável (Perecin, 2017).

Para que o metano do biogás de aterro possa ser utilizado como combustível é necessário tratamento prévio visando à remoção de CO_2 , visto que este afeta a capacidade calorífica do metano além de, na presença de umidade, contribuir diretamente para o desenvolvimento de corrosão das tubulações dos sistemas de transporte e armazenamento (Souza-Filho et. al, 2018). Além disso, a aplicação do biogás como combustível, sem remoção de sulfeto de hidrogênio (H_2S), leva à geração de dióxido de enxofre (SO_2), que é um outro poluente tóxico e um dos principais contribuintes para a chuva ácida na atmosfera (Bourn *et al.*, 2018).

Existem vários métodos para o aproveitamento do potencial energético dos resíduos dispostos em aterros sanitários. Todavia, para uma captação segura do biogás produzido, evitando maiores danos a atmosfera, é necessário que o aterro esteja em conformidade com normas nacionais, assim como a utilização de sistemas de captação eficientes. (Souza-Filho, 2016). 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. Entretanto, novas pesquisas também devem se preocupar com a eficiência de custos e os efeitos dos tratamentos com biogás, uma vez que foi constatado que esses tópicos raramente haviam sido incluídos em estudos em escala piloto.

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_4 . 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_2 (Goulding e Power, 2013). Várias técnicas de purificação de biogás vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de potencializar o seu uso.

O biogás é uma fonte alternativa de metano, devido à sua disponibilidade e capacidade de renovação, porém possui elevada porcentagem de dióxido de carbono e traços de sulfeto de hidrogênio que devem ser removidos para se obter o biogás de qualidade aceitável para o transporte e aplicação energética (Niklevicz, 2015).

Ainda segundo Niklevicz (2015), a remoção de dióxido de carbono é importante, pois este gás reduz o calor específico do biogás e aumenta os custos de compressão, armazenamento e transporte. A

remoção eficiente de sulfeto de hidrogênio é um critério de suma importância para grande parte das aplicações do biogás pois, além de causar corrosões em estruturas de metal, como tubulações, cercas e equipamentos (motores), pode causar também problemas como a chuva ácida, devido a oxidação do sulfeto de hidrogênio a dióxido de enxofre, o qual é posteriormente convertido a ácido sulfúrico. Causa também problemas de saúde aos seres humanos e animais, e dependendo do tempo de exposição e da concentração, este gás pode ser fatal.

No processo de purificação do biogás e conversão deste para biometano retira-se o dióxido de carbono até que a porcentagem de metano fique próxima a do gás natural, para que possa ser utilizado nos mesmos fins (Bourn, et al, 2018).

Há várias formas disponíveis para a retirada das substâncias indesejadas. A decisão de quais substâncias serão removidas e das técnicas provem da qualidade requerida do combustível para a utilização pretendida e da sua composição inicial (Perecin, 2017). Essas tecnologias para purificação do biogás funcionam com o objetivo de padronizar o gás, adequar requerimentos legislativos e aumentar o valor calorífico do gás com o enriquecimento de metano. São citadas na literatura alguns dos métodos empregados na remoção de CO₂ do biogás, destacando entre eles: (a) adsorção em zeólitas e carvão ativado, (b) absorção em meio alcalino, (c) separação criogênica, (d) remoção biológica e (e) separação por membranas (Bourn, et al, 2018).

Este trabalho teve como objetivo efetuar a purificação de biogás proveniente do Aterro Sanitário de Palmas (TO). O tratamento foi realizado através do processo de absorção de CO₂ em colunas de lavagem (tipo “spray tower scrubbers”) de gases através da absorção com reação química com a remoção de CO₂ em solução de Ca(OH)₂.

Metodologia

Local da pesquisa

O Aterro Sanitário de Palmas está localizado a 26 km do centro da cidade, na zona rural, ao sul do município. A área do aterro é de 95.77 ha (cercada), possuindo uma guarita na entrada, na guarita ficam os responsáveis pelo controle de coleta dos dados como, tipo de resíduos, placa, horário e saída de veículos e pessoas, e uma balança de 30 toneladas para conhecer a quantidade dos resíduos gerados. No processo de tratamento dos resíduos, são empregados os seguintes equipamentos: pá mecânica, retroescavadeira e caminhão basculante e trator de esteira para a dispersão e compactação dos resíduos.

As células, com dimensões 180m x 60m e 2.5m de profundidade, são impermeabilizadas com manta geomembrana PEAD (Polietileno de Alta Densidade) de 2mm. O sistema de drenagem do chorume gerado é constituído por tubos de concreto perfurados e interligados aos de drenagem

de gases que direcionam o chorume para o tratamento. O sistema de tratamento do chorume é composto por 03 lagoas (1 lagoa anaeróbia e 02 facultativas) e uma vala de infiltração. Os gases são drenados por tubos verticais, perfurados de concreto de 1.20 m de diâmetro protegidos com brita nº 4 e tela de 2 m de diâmetro, e queimados em drenos abertos.

Para a realização desta pesquisa foi utilizada apenas uma célula para coleta de amostras.

Medição de fluxo e coleta de biogás

Para realização das medições do biogás foi utilizado 01 dreno vertical, onde foram efetuadas medições semanais e perfil diário. O dreno vertical já possui o fechamento com tampa de concreto com um orifício central, para saída do biogás, adaptado através de uma conexão de aço e tubulação de interligação à válvula de saída do biogás, onde se conecta através de tubulação de cobre ao medidor de vazão (Figura 1).

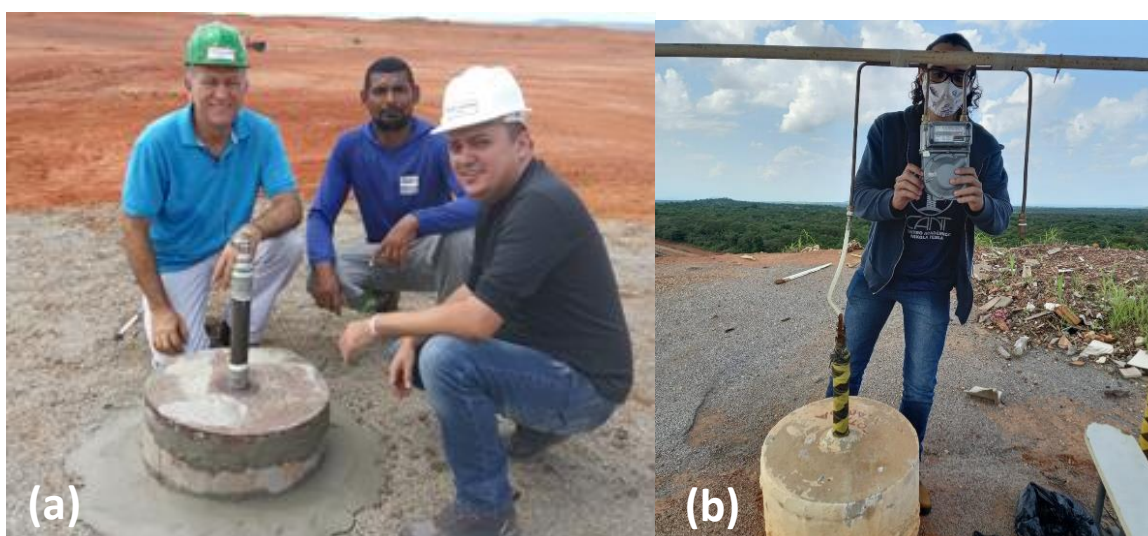


Figura 1. Adaptação do sistema para captação de gases no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins (a) e Medidor de Vazão (b).

A medição de vazão do biogás foi realizada através de um medidor de gás GLP, da Marca LAO G-0.6 Predial, já existente, interligado através de conexão de cobre maleável de 3/8, com vazão máxima de 0.016 m³/h, com sistema totalizador com modelo ciclométrico de 8 dígitos com proteção com tampa de policarbonato transparente (Figura 2).



Figura 2. Medidor de vazão de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins (a) e ajuste do sistema de medição (b).

Coleta e análise do biogás

A coleta do biogás foi realizada com o auxílio de saco plástico tipo BAG e seringa plástica de 100 mL. Posteriormente, usando um recipiente de vidro à vácuo com tampa vedante pressurizada, o biogás foi armazenado e enviado para análise cromatográfica.

Teste de purificação do biogás

A montagem do sistema de purificação do biogás foi realizada nas dependências do Laboratório LARSEN (IFTO - Campus Palmas).

O sistema de purificação é constituído por um lavador de gases seguido por uma coluna recheada com sílica gel para retirada de umidade. No lavador foi empregada solução de hidróxido de cálcio para retirada de gás carbônico.

O teste foi feito em sistema de lavagem de gás contendo um fluxo de solução contracorrente aos gases (Figuras 3 e 4).

Durante os testes foram avaliados os ajustes das seguintes variáveis de processo: vazão do biogás, a vazão da solução, concentração da solução e o tempo de contato. As amostras antes e após o processo foram coletadas e analisadas através de técnicas cromatográficas.

Foram empregadas solução de hidróxido de cálcio com duas concentrações diferentes (0.08 e 0.16 mol/L), seguindo recomendações de Srichat *et al.* (2017) e Pertiwinigrum *et al.* (2019). A

vazão da solução foi de 20 L/min e a vazão de biogás, controlada por válvula de fluxo, sendo fixada em 15 L/min. O tempo usado para testar a absorção de dióxido de carbono para cada uma das soluções foi de 30 minutos por solução por taxa de fluxo, conforme recomendação de Srichat *et al.* (2017). Os valores dos componentes do biogás foram medidos antes e após o tratamento para analisar a eficiência de tratamento do biogás aqui proposto.

Foram avaliadas as características químicas das soluções de hidróxido de cálcio antes e após processo de absorção, sendo feita a análise de pH da solução de lavagem com aparelho de medição de pH digital ao longo da operação do sistema. O controle da solução de deve ser feito através da medida de pH do líquido, e segundo Srichat *et al.* (2017), a solução lavadora deve ser substituída quando o pH da solução estiver próximo da neutralidade ($\text{pH} = 7$).

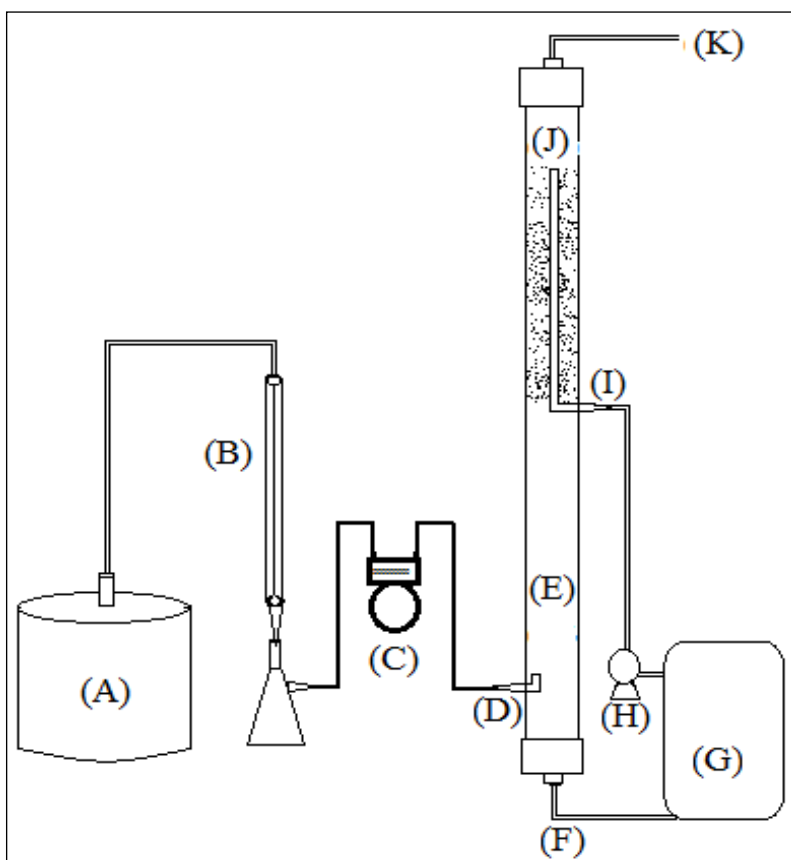


Figura 3. Lavador de biogás.

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



Figura 4. Lavador de biogás empregado nos ensaios.

Caracterização química do biogás

A Tabela 1 apresenta as condições adotadas na análise do biogás do aterro sanitário.

Foram empregados dois detectores, o FID (identificação dos hidrocarbonetos) e TCD para os demais gases (CO, CO₂, H₂, O₂, N₂).

Tabela 1. Condições operacionais do CG/TCD/FID utilizadas na análise do biogás

Cromatógrafo	T _{injetor}	Condições de Análises		
		T _{coluna}	T _{detector}	Vazão do Gás de Arraste
CG Reforma	25°C	Isotérmico 60°C	TCD1 100°C	25 mL/min
			TCD2 100°C	175 kPa
			FID 250°C	175 kPa

Resultados e discussão

Medição de fluxo

A Figura 5 apresenta o perfil de vazão diária de biogás no Aterro Sanitário de Palmas, Tocantins, sendo a quantidade de biocombustível aferida em um dos drenos de escape de gás do sistema. O volume de biogás acumulado diário foi de 18 m³.

No Brasil, grande parte do aproveitamento do biogás gerado nos aterros sanitários é feito através da queima direta em flares. Esse processo de queima converte o gás metano do biogás em dióxido de carbono (cerca de 21 vezes menos prejudicial a atmosfera). Por outro lado, alguns aterros empregam técnicas de captação e tratamento do biogás visando a transformação do biocombustível em energia elétrica. Normalmente a energia gerada nos aterros por meio da queima do biogás é utilizada estritamente para o abastecimento local, seja para iluminação das áreas de acesso, alimentação de alguns setores do aterro e similares (Zanette, 2009).

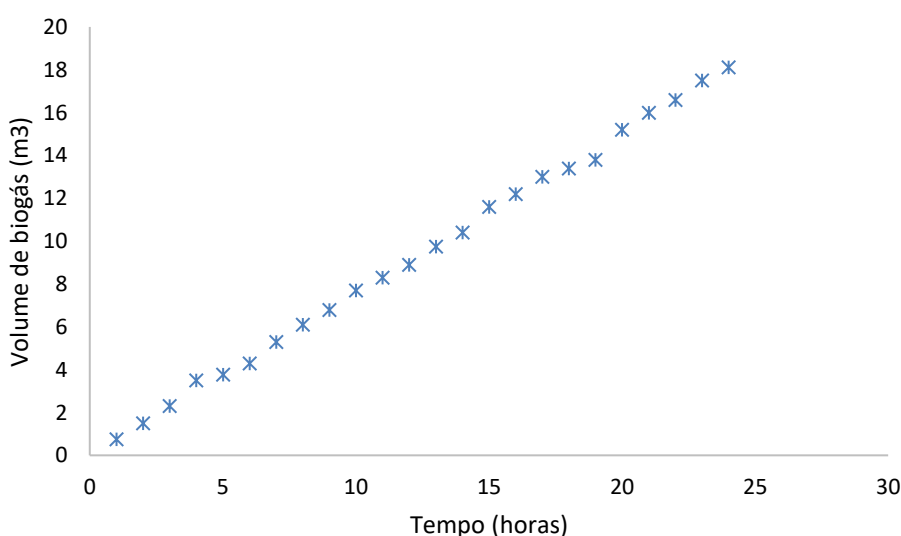


Figura 5. Perfil de vazão diária de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins.

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 5.264.015,50m³, o qual está sendo gerado 622,13m³/h.

A conversão do biogás gerado nos aterros sanitários em energia elétrica geralmente é feita mediante utilização de motogeradores de combustão interna. A aplicação do biogás proveniente de aterro para geração de energia é feita principalmente devido a estabilidade calorífica e a facilidade de operação do biocombustível (Santos *et al.*, 2018).

Purificação de biogás do Aterro Sanitário de Palmas (TO)

O biogás bruto estudado nessa pesquisa apresentou um teor de metano igual a 50 %, antes do processo de purificação, sendo esse teor de metano em biogás proveniente de aterros sanitários já reportado por outros pesquisadores (Ryckebosch *et al.* 2011).

Os dados experimentais obtidos nos testes da purificação de biogás proveniente do Aterro Sanitário de Palmas (TO) são apresentados na Tabela 2. O Teste-t foi realizado simulando variâncias equivalentes no tratamento estudado, objetivando verificar a existência ou não de diferença entre eles (Tabela 3).

Os dados observados nas Tabelas 2 e 3 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 (CO₂) 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 as 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.

Tabela 2. 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
Média	67.7	75
Desvio Padrão	2.51	10
Graus de Liberdade	2	2

Tabela 3. Análise estatística através do Teste-t simulando variâncias equivalentes nos testes de purificação de biogás.

Termos estatísticos	0.08 mol/L	0.16 mol/L
Média	67.7	75
Variância	6.33	100
Observações	3	3
Variância agrupada	53.16	
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	4	
Stat t	- 1.2318	
P(T<=t) uni-caudal	0.1427	
t crítico uni-caudal	2.1318	
P(T<=t) bi-caudal	0.2855	
t crítico bi-caudal	2.7764	

O valor obtido para o enriquecimento do CH₄ 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, 20 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 H₂S e CO₂, 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 (H₂O). Nos testes

de absorção, tratando o biogás com solução de NaOH 1M resultou na remoção completa de H₂S e CO₂. 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 CO₂ e H₂S nas primeiras horas de operação, sendo então observada o decaimento da remoção dos constituintes indesejáveis do biogás ao longo do tempo.

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, Tocantins, aproveitando o seu poder energético.

O perfil diário de vazão de biogás de 18 m³ indica uma possibilidade de aplicação desse biocombustível como recurso energético.

Antes e depois dos tratamentos, os valores dos componentes CO₂ e CH₄ do biogás foram determinados para se estimar a eficiência do tratamento empregado. A análise do biogás bruto mostrou uma porcentagem de 50% de CH₄. Durante os testes de transformação de biogás em biometano, empregando coluna de lavagem tipo “spray tower scrubbers” com solução alcalina foi obtida um teor de metano de 75 % quando se empregou solução de hidróxido de cálcio com concentração igual a 0.16 mol/L. Sugere-se para estudos futuros um sistema com 02 lavadores em serie para aumentar a eficiência do tratamento do biogás, testando otras vazões para soluções de lavagem de biogás.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Tocantins (FAPT) (Edital FAPT N° 01/2019), pelo financiamento do projeto.

Referências bibliográficas

- Araujo, A P C. (2017) Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 98 p.
- Barros, R. M., Filho, G. L. T., Silva, T. R. D. (2014) The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy*, **65**, 150 – 164p. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.028>
- Bourn, M., Robinson, R., Innocenti, F., Scheutz, C. (2018) Regulating landfill using measured methane emissions: An English perspective. *Waste Management*, **87**, 860 – 869p. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.032>

- Faria, M. (2010) Biogás produzido em aterros sanitários – aspectos ambientais e aproveitamento do potencial energético. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade de São Paulo. 88 p.
- Goulding, D. P., Power, N. (2013) Which is the preferable biogas utilisation technology for anaerobic digestion of agricultural crops in Ireland: Biogas to CHP or biomethane as a transport fuel? *Renewable Energy*, **53**, 121 – 131p. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.11.001>
- Marques, M. S. (2019) Qualidade ambiental e estudo da produção e aproveitamento energético do biogás produzido pelo Aterro Sanitário de Palmas – TO. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Tocantins. 129 p.
- Niklevicz, R R. (2015) Implantação e otimização operacional de um sistema para remoção de sulfeto de hidrogênio, com uso de soluções de fe/edta, de biogás proveniente de efluentes de suinocultura. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 102 p.
- Nizami, A., Rehan, M., Naqvi, M., Ouda, O., Shahzad, K., Syamsiro, M., Waqas, M., Miandad, R., A, Z., Ismail, I. M. (2017) Energy, Economic and Environmental Savings by Waste Recycling: A Case Study of Madinah City. *Energy Procedia*, **142**, 910 – 915p. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.146>
- Perecin, D. (2017) Comparação entre as estratégias de aproveitamento energético do biogás: geração de energia elétrica versus produção do biometano. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Energia), Universidade de São Paulo, 164 p.
- Pertiwinigrum, A., La'aliya, I., Windiaka, B. U., Yusiati, L. M., Harto, A. W. (2019) Combustion of Purified Biogas after Carbon Dioxide Absorption Using Sodium Hydroxide. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, **353**, 1 – 5p. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/353/1/012014>
- Pinheiro, N. C. (2015) Aproveitamento energético de gás de aterro para produção de energia utilizando membranas para purificação do biogás. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química e de Petróleo), Universidade Federal Fluminense, 92 p.
- Santos, I. F. S. D., Gonçalves, A. T. T., Borges, P. B., Barros, R. M., Lima, R. S. (2018) Combined use of biogas from sanitary landfill and wastewater treatment plants for distributed energy generation in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, **136**, 376 – 388p. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.011>
- Souza-Filho, J.D.V. (2016) Utilização de peneira molecular para purificação do gás de aterros sanitários. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental), Universidade Federal do Ceará, 92 p.
- Souza-Filho, J. D. V., Lima, A. C. A., Stefanutti, R., Silva, W. M. B., Bastos-Neto, M., Vilarrasa-Garcia, E., Loiola, A. R., Mota, F. S. B. (2018) Zeólita 4A para purificação do gás de aterro sanitário. *Quím. Nova*, **41**, 100 – 104p. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170133>
- Srichat, A., Suntivarakorn, R., Kamwilaisak, K. (2017) A development of biogas purification system using calcium hydroxide and amine solution. *Energy Procedia*, **138**, 441 – 445p. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.196>
- Zanette, A. L. (2009) Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil. Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 105 p.