

Potencial de geração de biogás, biometano e hidrogênio a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos no Nordeste

Sérgio Peres - *Universidade de Pernambuco* –
Departamento de Engenharia Mecânica/PPGES/sergio.peres@upe.br

Resumo

Segundo o Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa (Brasil, 2022), as emissões no Brasil totalizaram 1,467 Tg CO₂e, o setor que mais contribuiu o uso de terra, mudança do uso da terra e florestas (LULUCF), sendo os resíduos responsáveis por 4,5% destas emissões. Na região Nordeste, as emissões contribuíram com 18,23% das emissões nacionais (267.499 Gg CO₂e), e os resíduos contribuíram com 6% destas emissões (16.050 Gg CO₂e), sendo o quarto maior emissor de GEE no Nordeste. A fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, a FORSU, poderia ser utilizada na geração de biogás através da digestão anaeróbia, evitando o seu descarte em aterros. Este biogás gerado, por sua vez, pode ser utilizado para geração de eletricidade ou purificado para a produção de biometano, que é um substituto renovável do gás natural em todas as suas aplicações, podendo além de ser utilizado para geração de eletricidade ou comprimido para ser utilizado como combustível veicular, o bioGNV. Além disso, através da reforma a vapor, o biometano pode ser utilizado como matéria-prima para a produção de hidrogênio sustentável (hidrogênio musgo), através da reforma a vapor, que é um combustível muito importante para o processo de descarbonização do planeta. A FORSU consiste da matéria orgânica (resíduos úmidos) presentes nos RSU. Segundo a ABRELPE (2020), a FORSU representa 45,3% do RSU no Brasil. Assim sendo, a quantidade de FORSU gerada no NE corresponde a aproximadamente, a 24.451 t.dia⁻¹. Caso estes resíduos fossem utilizados como matéria-prima em biodigestores, poderiam gerar 2.689.610 Nm³.dia⁻¹ de biogás, com um teor aproximado de 60% de metano. Este biogás poderia ser purificado e gerar aproximadamente 1.613.766 Nm³.dia⁻¹ de biometano, que por sua vez, poderia produzir 412.757 toneladas por dia de hidrogênio sustentável ou 5.486.804 kWh dia⁻¹ de eletricidade. Como 1 t de FORSU gera 46 kg de CO₂e (Yoshida, 2012), com o uso da FORSU seriam evitadas emissões de 1,125 Gg de CO₂e.dia⁻¹, ou seja, aproximadamente, 410,532 Gg de CO₂e.ano⁻¹. Como as metas de descarbonização estabelecidas pelo Brasil são de redução das emissões de GEE, em 37% até 2025, 43% até 2030 e atingir a neutralidade até 2050, a valorização energética dos resíduos, contribuiria significativamente para a redução deste passivo ambiental além de gerar eletricidade, biocombustíveis e/ou hidrogênio sustentável de forma distribuída, gerando emprego e renda nas localidades que utilizarem esta tecnologia. Estas ações estão de acordo com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, principalmente, com as ODS 13 – Ação contra mudança global do clima; ODS 11- Cidades e comunidades sustentáveis; e, o ODS 7 – Energia acessível e limpa, e com reflexo nos demais ODS.

Introdução

A preocupação com o aquecimento global, denotam ações para conter as mudanças climáticas conforme estabelecido pelo ODS 13 – Ação contra mudança global do clima e metas definidas pelos países signatários do Acordo de Paris (COP21) da UNFCCC, através da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), na qual o Brasil se compromete a reduzir as emissões de GEE, em 37% até 2025, 43% até 2030 e atingir a neutralidade até 2050, em comparação às emissões verificadas em 2005 (BRASIL-MMA, 2023).

Em 2016, foram emitidos 1,467 Tg CO₂e de GEE no Brasil, sendo 267.499 Gg CO₂e, no Nordeste, ou seja, 18,23% dos GEE. Os resíduos orgânicos (resíduos úmidos) foram a quarta maior fonte de emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Nordeste Brasileiro, com a emissão de 16.050 Gg CO₂e (Brasil, 2022).

Porém a FORSU pode ser utilizada como matéria-prima em reatores anaeróbios, chamados biodigestores para serem degradadas por micro-organismos e gerar biogás que é um combustível gasoso, constituído, basicamente, de metano (60%) e dióxido de carbono (40%), com traços de gás sulfídrico (ADNA et al., 2019). Os resíduos do processo da biodigestão anaeróbia são chamados de digestato e são biofertilizantes que podem ser utilizados em plantações e lavoura (FURTADO; PADILHA; ALMEIDA, 2021). Este gás pode ser purificado, com a remoção do dióxido de carbono e do gás sulfídrico, produzindo o chamado biometano.

O potencial de produção de biogás com os RSU do Nordeste, a sua purificação para biometano e seu uso para a produção de hidrogênio sustentável estão descritos neste artigo.

Resíduos sólidos urbanos, a geração do biogás e biometano

Os resíduos foram responsáveis por 4,5% das emissões de GEE no Brasil. E, no Nordeste, o percentual de emissões de GEE com resíduos foi de 6% das emissões totais, aproximadamente 16.050 Gg CO₂e, sendo o quarto maior emissor. Porém, em alguns estados como Pernambuco, em 2019, os resíduos constituídos de resíduos sólidos urbanos (RSU) e esgoto, foram a segunda maior fonte poluidora, gerando 22,74% e 4,38% das 19,513 Gg de GEE emitidas (SEMAS-PE, 2022).

O percentual da fração orgânica dos resíduos sólidos (FORSU) varia por localidade, município e estado. Para este trabalho, foi utilizado o percentual de 45,3% que aproximadamente a média nacional (ABRELPE, 2020). A Tabela 1 ilustra a produção de RSU e FORSU nos estados do Nordeste.

Tabela 1 - Produção de RSU e FORSU nos estados do Nordeste

ESTADO	RSU ¹ (t/ano)	FORSU ² (t.ano ⁻¹)	FORSU ² (t.dia ⁻¹)
ALAGOAS	1.092.810	495.043	1.356
BAHIA	5.071.310	2.297.303	6.294
CEARÁ	3.534.660	1.601.201	4.387
MARANHÃO	2.514.120	1.138.896	3.120
PARAÍBA	1.282.245	580.857	1.591
PERNAMBUCO	3.285.730	1.488.436	4.078
PIAUI	1.141.355	517.034	1.417
RIO GRANDE DO NORTE	1.115.075	505.129	1.384
SERGIPE	663.570	300.597	824
NORDESTE (2020)	19.700.875	8.471.496	24.451

Fonte: ¹ABRELPE, 2020; ²Calculado por S. Peres

Os RSU são geralmente descartados em aterros e lixões, onde causam problemas ambientais com emissões de metano (mesmo os que possuem captação de metano), geração de lixiviado que causam impacto ao meio-ambiente. Uma maneira de evitar o seu descarte é a sua valorização como matéria-prima para a produção de combustíveis renováveis e o seu uso energético. Uma das formas de utilização é como substrato (matéria-prima) em biodigestores, que são reatores anaeróbios, onde ocorre a degradação da matéria orgânica com micro-organismos e que resultam na produção de biogás e digestato (FURTADO; PADILHA; ALMEIDA, 2021). Os principais constituintes do biogás são o metano (60%), o dióxido de carbono (40%) e contaminantes como o gás sulfídrico e outros (ADNAN et al., 2019). O biogás pode ser purificado para remoção dos contaminantes para aumentar o seu teor de metano e consequentemente o seu poder calorífico. Segundo a ANP, no Brasil, o biometano deve possuir um teor de metano mínimo de 90% de metano e atender as especificações técnicas citadas na Resolução ANP 866/2022 para a sua comercialização.

O potencial de geração do biogás e suas características diferem se a FORSU é descartada num aterro sanitário e num biodigestor. Neste último, as variáveis de processo (pH, temperatura, agitação, teor de água, concentração de substrato, alcalinidade entre outros) são controladas e otimizadas, enquanto que no aterro não há controle das mesmas. Por isso, a produção de biogás utilizando a FORSU, no aterro é de aproximadamente $52 \text{ Nm}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ e teor de metano de 53%; enquanto que nos biodigestores do tipo CSTR, chegam a valores de $110 \text{ Nm}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ e um teor de metano de 60% (PERES; PALHA, 2016; LINVILLE et al., 2015; ADNAN et al, 2019). Para este estudo de caso, foram utilizados os dados de geração de biogás em biodigestores, por ser mais eficiente, e devido ao fato de existir a Diretiva 1999/31/CE da União Europeia reduzindo o descarte em 65% em peso da FORSU em aterros sanitários, e a obrigatoriedade do reciclo dos resíduos orgânicos em alguns estados americanos (MASS.GOV, 2022) como forma de conter as emissões de GEE, e por ser considerada, uma forma de reciclagem dos resíduos.

De acordo com Wethäuser et al. (2010) apud Almeida (2021), os três processos principais de remoção do dióxido de carbono (CO_2) do biogás são: lavagem com água sob alta pressão, processos de adsorção e lavagem química (com soluções de monoetanolamina- MEA ou metanolamina – DEA). Portanto, para efeito de cálculo considerou-se que o CO_2 foi totalmente removido, e foi produzido o biometano com o teor de metano de 100%.

A Tabela 2 ilustra o potencial de geração de biogás e biometano com a FORSU em todos os estados do Nordeste.

Tabela 2 - Produção de biogás e biometano nos estados do Nordeste

ESTADO	FORSU (t.dia⁻¹)	BIOGÁS (Nm³.dia⁻¹)	BIOMETANO (Nm³.dia⁻¹)
ALAGOAS	1.356	149.160	89.496
BAHIA	6.294	692.340	415.404
CEARÁ	4.387	482.570	289.542
MARANHÃO	3.120	343.200	205.920
PARAÍBA	1.591	175.010	105.006
PERNAMBUCO	4.078	448.580	269.148
PIAUI	1.417	155.870	93.522
RIO GRANDE DO NORTE	1.384	152.240	91.344
SERGIPE	824	90.640	54.384
NORDESTE (2020)	24.451	2.689.610	1.613.766

Hidrogênio Sustentável

Atualmente, o método mais comum para produção de hidrogênio (H_2) é a Reforma a Vapor do Metano (*steam methane reform- SMR*) com a reação de deslocamento água-gás (*water-gas shift reaction - WGSR*) utilizando o gás natural, que corresponde a 47% da produção mundial que é de 75 Mt H_2 (IRENA, 2022).

Na SMR, o metano reage com o vapor entre 700°C e 1100°C com uma pressão que varia entre 3 a 25 bar, na presença de um catalisador. Para cada molécula de metano são produzidas 4 moléculas de H_2 e 1 molécula de CO_2 (BASILE, 2015). Porém, como a eficiência do reformador varia de 65 a 75%. Porém, segundo Singh et al (2015), relata uma eficiência de 72% para os reformadores de metano a vapor. O H_2 possui as seguintes características: - a massa específica de 0,08376 kg.Nm⁻³; - poder calorífico inferior (PCI) de 119,93 MJ.kg⁻¹. Portanto, para produzir 1 kg de H_2 são necessários 11,94 Nm³. O poder calorífico inferior do H_2 é de 10,04 MJ.Nm⁻³, tendo aproximadamente, 28% do PCI do metano que é 35,818 MJ.Nm⁻³ (NBR-15213).

A Tabela 3 ilustra o potencial de produção de H_2 sustentável no Nordeste utilizando a FORSU como matéria-prima e utilizando a reforma a vapor do biometano como rota tecnológica.

Tabela 3 – Potencial de produção de H_2 sustentável utilizando biometano da FORSU

ESTADO	BIOMETANO (Nm ³ .dia ⁻¹)	HIDROGÊNIO	
		(Nm ³ .dia ⁻¹)	(t.dia ⁻¹)
ALAGOAS	89.496	257.748	22.891
BAHIA	415.404	1.196.364	106.249
CEARÁ	289.542	833.881	74.057
MARANHÃO	205.920	593.050	52.669
PARAÍBA	105.006	302.417	26.858
PERNAMBUCO	269.148	775.146	68.841
PIAUI	93.522	269.343	23.920
RIO GRANDE DO NORTE	91.344	263.071	23.363
SERGIPE	54.384	156.626	13.910
NORDESTE (2020)	1.613.766	4.647.646	412.757

Portanto, verifica-se que se esta rota de utilização da FORSU para a produção de H_2 sustentável, o NE teria condições de produzir diariamente cerca de 400.000 t, sendo a Bahia o estado de maior capacidade de produção de H_2 sustentável por esta rota, com o potencial de produção de 106.247 t.dia⁻¹, seguido pelos estados do Ceará e Pernambuco, com potencial de produção de 74.000 t.dia⁻¹ e 68.841 t.dia⁻¹, respectivamente. Estes dados são importantes, quando o NE se habilita como um potencial produtor de H_2 sustentável utilizando eletrólise utilizando energia eólica e solar, que são fontes intermitentes de energia, e esta rota da biomassa apresenta um potencial de produção de H_2 plena. Este valor ainda seria bem maior, se fossem utilizados outros substratos como excrementos animais, silagens, águas residuárias como a vinhaça, manipueira, esgoto e lodo de esgoto e resíduos agrícolas. Além da produção do biogás, o uso de resíduos orgânicos em biodigestores produz como subproduto o digestato que é um biofertilizante que pode ser utilizado na lavoura e plantações; e, reduz significativamente o passivo ambiental produzido por estes resíduos.

Conclusão

A utilização da FORSU é uma alternativa promissora de produção de H₂ sustentável com um potencial de produção de aproximadamente 400.000 t.dia⁻¹, tendo os estados da Bahia, Ceará e Pernambuco com os que possuem a maior capacidade de produção com 16.249 t.dia⁻¹, 74.000 t.dia⁻¹ e 68.841 t.dia⁻¹, respectivamente. Além disso, este valor pode ser muito maior caso sejam utilizados excrementos animais e resíduos da lavoura. O uso da FORSU para a produção de H₂ sustentável gera como coproduto o digestato que é um biofertilizante que pode ser aplicado na lavoura e plantações, além disso, haverá uma redução significativa do passivo ambiental causado pelo descarte da FORSU, seja nos aterros sanitários ou em locais inapropriados como lixões e outros locais. Estas ações estão condizentes com a ODS 13 e vai ajudar o Brasil atingir as metas estabelecidas NDC, de reduzir as emissões de GEE, em 37% até 2025, 43% até 2030 e atingir a neutralidade até 2050.

Referências

ABRELPE – Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020.

ABRELPE – Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022.

ADNAN, A. I., ONG, M. Y., NOMANBHAY, S., CHEW, K. W., SHOW, P. L.- Technologies for biogas upgrading to biomethane. **Bioengineering**.v6, 92; doi:10.3390/bioengineering6040092.

ALMEIDA, H. C. – Tratamento e purificação de biogás. **FUNDAMENTOS DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA – CONCEITOS E PROCESSOS**. ISBN-10: 6558611163.

BASILE, A., LIGUORI, S., LULIANELLI, A. – Membrane reactors for methane steam reforming (MSR) - <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-223-5.00002-9>. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782422235000029>. Acesso em 22/06/2023.

BRASIL – Resultados do inventário nacional de emissões de gases de efeito estufa por unidade federativa. **Edição 1.1**. 2022.

BRASIL, MMA – Acordo de Paris. Disponível no site <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em 22/06/2023.

FURTADO, A. C., PADILHA, J. C., ALMEIDA, H. C. – A energia do Biogás. **FUNDAMENTOS DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA – CONCEITOS E PROCESSOS**. ISBN-10: 6558611163.

IRENA – Hydrogen. Disponível em <file:///E:/FORUM%20GD%20NATAL%20-%20JUNE%202023/IRENA%20Hydrogen.pdf>. 2022. Acesso em 22/06/2023.

LINVILLE, J.L.; SHEN, Y.; WU, M.M.; URGUN-DEMIRTAS, M. Current State of Anaerobic Digestion of Organic Wastes in North America. **Curr. Sustainable Renewable Energy Rep.** v. 2, p. 136-144. 2015.

MASS.GOV – Commercial food material disposal ban. Disponível em <https://www.mass.gov/guides/commercial-food-material-disposal-ban>. Acesso em 22/06/2023.

NAÇÕES UNIDAS – BRASIL – Objetivos de desenvolvimento sustentável. Disponível no site <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em 22/06/2023.

NBR-1513. Gás Natural – Cálculo de propriedades físico-químicas a partir da composição.

NYSERDA – Hydrogen Fact Sheet – Hydrogen Production – SMR.

PERES, S., PALHA, M. A. P. F. – Inventário da Biomassa produtora de biogás em Pernambuco. 2016. ISBN: 978- 85-92897-07-9.

PERNAMBUCO, SEMAS – Inventário das emissões de gases de efeito estufa em Pernambuco. 2022. Disponível em https://semas.pe.gov.br/wp-content/uploads/2022/05/Inventario-2015_2020_Versao-MAIO_22.pdf. Acesso em 22.06.2023.

SINGH, S., JAIN, S., VENKATESWARAN, PS., TIWARI, A. K., NOUNI, M. R., PANDEY, J. K., GOEL. S. – Hydrogen: a sustainable fuel for future of the transport sector. **Renewable and sustainable energy reviews**. V 51, 623-633, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.040> 1364-0321/& 2015 Elsevier Ltd.

UE – DIRECTIVA 1999/31/CE do Conselho, de 26 de Abril de 1999, relativa à deposição de resíduos em aterros. Disponível no site <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0031>. Acesso em 22/6/2023.

YOSHIDA, H.; GABLE, J.J.; PARK, J.K. Evaluation of organic waste diversion alternatives for greenhouses gas reduction. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 60 p. 1-9. 2012.