

Simulação da produção de biogás a partir do bagaço de cana de açúcar

Simulation of Biogas Production from Sugarcane Bagasse

Gabriel Ferreira dos Santos¹, Gracielle Johann²

RESUMO

A produção de biogás por meio do processo de digestão anaeróbica (DA) é uma abordagem promissora e sustentável para a valorização de biomassas lignocelulósicas, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a transição para fontes de energia mais limpas. A DA envolve a decomposição de resíduos orgânicos por microrganismos em condições anaeróbicas, resultando na produção de biogás, composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), obtendo subproduto da DA, (digestato), que pode ser utilizado como fertilizante. Este fornece uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte da modelagem e simulação do processo de produção de biogás, com foco na utilização de biomassas lignocelulósicas, como o bagaço de cana de açúcar. A modelagem e simulação desempenham um papel crucial na compreensão dos mecanismos processo de DA, permitindo a otimização e o dimensionamento de sistemas de produção de biogás em escala industrial. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica da modelagem e simulação desse processo, fornecendo um contexto para a pesquisa. Em seguida, procedeu-se à simulação numérica da produção de biogás com base em dados da literatura, aplicando um modelo matemático que leva em consideração a dinâmica das células vivas, mortas e a composição do substrato.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa lignocelulósica; Digestão anaeróbica; Modelagem; Sustentabilidade energética.

ABSTRACT

Biogas production through the anaerobic digestion (AD) process is a promising and sustainable approach for the valorization of lignocellulosic biomass, contributing to the reduction of greenhouse gas emissions and the transition to cleaner energy sources. AD involves the decomposition of organic waste by microorganisms under anaerobic conditions, resulting in the production of biogas, primarily composed of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂). It also yields a byproduct of AD, called digestate, which can be used as a fertilizer. This provides a comprehensive literature review on the state-of-the-art modeling and simulation of the biogas production process, with a focus on the use of lignocellulosic biomass such as sugarcane bagasse. Modeling and simulation play a crucial role in understanding the mechanisms of the AD process, allowing for the optimization and scaling of biogas production systems on an industrial scale. Initially, a literature review of the modeling and simulation of this process was conducted, providing context for the research. Subsequently, numerical simulation of biogas production was carried out based on literature data, applying a mathematical model that considers the dynamics of live and dead cells and substrate composition.

KEYWORDS: Lignocellulosic biomass; Anaerobic digestion; Modeling; Energy Sustainability

INTRODUÇÃO

A utilização da biomassa lignocelulósica, como o bagaço de cana-de-açúcar, para a produção de biogás tem se destacado como uma opção ambientalmente amigável e sustentável para atender às crescentes demandas energéticas. Esse processo oferece a oportunidade de gerar biogás, uma mistura de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), a partir de resíduos orgânicos, proporcionando uma fonte renovável de energia que reduz a dependência dos combustíveis fósseis (NAGARAJAN; RANADE, 2019).

¹ Bolsista/voluntário da Fundação Araucária. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, Paraná, Brasil. E-mail: gabrielferreirasantos@alunos.utfpr.edu.br ID Lattes: 1605912348471939.

² Docente do Curso de Engenharia De Bioprocessos E Biotecnologia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, Paraná, Brasil. E-mail: graciellej@utfpr.edu.br. ID Lattes: 0042481312764501.



A modelagem permite representar matematicamente as complexas interações entre as variáveis envolvidas na produção do biogás através da biomassa lignocelulósica. Desempenhando um papel fundamental na identificação dos principais fatores que influenciam a eficiência do processo e na avaliação das estratégias para otimização. Além disso, a simulação oferece a possibilidade de testar virtualmente diferentes cenários operacionais, minimizando custos e impactos ambientais. Essa abordagem possibilita o desenvolvimento de processos mais eficientes e sustentáveis, contribuindo para reduzir as emissões dos gases do efeito estufa e mitigar as mudanças climáticas. Este estudo explora a interseção entre a produção de biogás a partir da biomassa lignocelulósica e as técnicas de simulação e modelagem de processos (MENDES et al., 2023).

Este estudo explora a interseção entre a produção de biogás e a simulação desta operação de produção de bioenergia. O projeto de digestão anaeróbica utilizado para esta pesquisa, trata-se de um reator em batelada para produção de biogás a partir de biomassa lignocelulósica do bagaço da cana de açúcar, sendo este resíduo subproduto da produção de álcool, em que geralmente descartado pela indústria de combustíveis. Os autores avaliaram o potencial para produção de gases a partir deste substrato, baseado em estequiometria de reação que leva em consideração a composição elementar da matéria-prima e assume sua conversão para CH₄. Ressaltando benefícios, como a redução das emissões de gases do efeito estufa e a geração de energia renovável. Ao compreendermos profundamente os mecanismos envolvidos na produção de biogás, podemos desenvolver estratégias mais eficazes para maximizar o rendimento e a eficiência desse processo (NAGARAJAN; RANADE, 2020).

Portanto simular e modelar este processo permite uma análise detalhada das diferentes variáveis operacionais, como temperatura, pressão, concentração de nutrientes e características da biomassa. Isso possibilita otimizar as condições de produção, resultando em um aumento significativo na produtividade e tornando economicamente viável a produção do biogás. Além disso, a simulação também desempenha um papel importante na redução dos custos e riscos associados ao desenvolvimento de novos processos. Antes mesmo da implementação física em larga escala da planta produtora do biogás, é possível realizar testes virtuais detalhados para identificar possíveis problemas e ajustar o projeto, economizando recursos financeiros e temporais (FERRARO et al., 2019).

Neste sentido a revisão de literatura para obtenção do modelo abrangeu fontes, incluindo PubMed, Google Scholar, Web of Science e outras bases de dados relevantes. O critério de seleção dos artigos foi baseado na pertinência e na qualidade dos estudos. Ressaltando a simulação e modelagem da geração de biogás a partir de biomassa lignocelulósica, demonstrando melhoria da eficiência dos processos de transformação de resíduos em bioenergia. O objetivo do presente trabalho foi simular a produção de biogás a partir do bagaço de cana de açúcar utilizando dados da literatura.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados experimentais utilizados foram obtidos de artigos de referência para desenvolver um modelo e realizar simulações relacionadas à produção de biogás. Estes foram extraídos de pesquisas realizadas em fontes como PubMed, Google Scholar, Web of Science, que exploraram a produção de biogás a partir de bagaço de cana-de-açúcar. Para o bagaço de cana-de-açúcar, dados do Potencial de Produção do Biometano (BMP) provenientes de experimentos realizados após o pré-tratamento com hidrociclone (HC),

como descrito nos estudos conduzidos por Nagarajan em 2019. Esses dados foram divididos em quatro conjuntos, cada um correspondendo a diferentes condições de pré-tratamento. A composição elementar da biomassa (carbono, hidrogênio e nitrogênio) e do inóculo foi determinada, permitindo calcular os parâmetros cinéticos essenciais para o modelo, através do ajuste por mínimos quadrados (NAGARAJAN; RANADE, 2019).

Parâmetros cinéticos obtidos em batelada BMP, Número de passagens pelo dispositivo baseado em vórtice HC 9, Taxa de crescimento específico máxima, $\mu_{max} (h^{-1}) = 0,045$, Taxa de morte celular $kd (h^{-1}) = 0,030$, Constante de meia-velocidade, $K_s \left(\frac{kg}{m^3}\right) = 3$, Parâmetros utilizados para simulações do caso base em digestão anaeróbica contínua: Taxa de entrada de massa $\left(\frac{kg}{h}\right) = 12.350$, Tempo de residência hidráulica, TRH (dias) 7, Volume do digestor, $V (m^3) = 2000$, Fração de massa de substrato na entrada $\left(\frac{kg}{kg \text{ de lama de entrada}}\right) = 0,1$, Fração de massa de cinzas na entrada $\left(\frac{kg}{kg \text{ de lama de entrada}}\right) = 0,004$, Fração de massa de água na entrada $\left(\frac{kg}{kg \text{ de lama de entrada}}\right) = 0,8960$ (NAGARAJAN et al., 2021).

As equações descritas no artigo de referência foram utilizadas na simulação, juntamente com os dados experimentais obtidos a partir das equações disponibilizadas por Nagarajan et al. 2021, obtendo dados experimentais e condições iniciais para a simulação. A implementação dessas equações e a realização das simulações foram realizadas utilizando o software Maple 2020. É importante destacar que o acesso a esta ferramenta de modelagem computacional foi possível através dos recursos disponibilizados nos laboratórios de computação aplicada da UTFPR, localizados no campus de Dois Vizinhos.

Os balanços de massa dos componentes podem ser escritos como de acordo com (NAGARAJAN et al., 2021):

$$\text{Células: } \frac{d(M \cdot mx)}{dt} = M_i \cdot mx_i - M_o \cdot mx + \mu XV - kd \cdot XV \quad (1)$$

$$\text{Substrato: } \frac{d(M \cdot ms)}{dt} = M_i \cdot ms_i - M_o \cdot ms - S \cdot V \quad (2)$$

$$\text{Nutrientes: } \frac{d(M \cdot mn)}{dt} = M_i \cdot mn_i - M_o \cdot mn - N \cdot V \quad (3)$$

$$\mu = \mu_{max} \left(\frac{S}{K_s + S} \right) \quad (4)$$

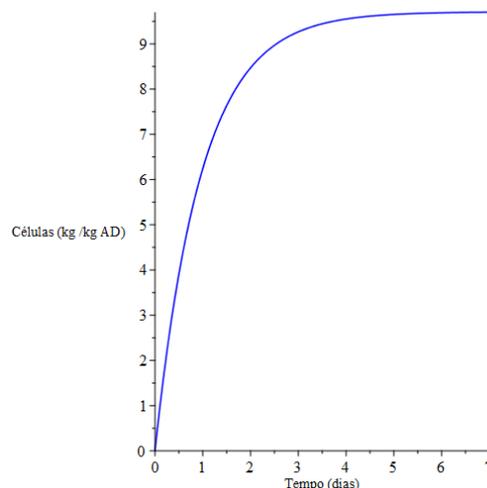
Onde: V : Volume do reator de digestão anaeróbia (AD) (m^3); M : Taxa de fluxo de massa (kg/h), com subscritos 'i' e 'o' representando as taxas de entrada e saída de massa, respectivamente; μ_{max} : Taxa máxima de crescimento específico das células microbianas ($1/h$); K_s : Constante de meia-velocidade, que representa a concentração de substrato na qual a taxa de crescimento é metade da taxa máxima (kg/m^3); K_d : Taxa de morte celular ($1/h$); S : Concentração de substrato no AD (kg/m^3); X : Concentração de células no AD (kg/m^3); mx : Fração em massa de células em relação ao conteúdo total do AD (kg de células/ kg de conteúdo do AD); mx_i : Fração em massa de células na entrada do AD em relação à massa total na entrada (kg de células/ kg de entrada); ms : Fração em massa de substrato em relação ao conteúdo total do AD (kg de substrato/ kg de conteúdo do AD); mn :

São as frações de massa de nutrientes (kg/kg de conteúdo de AD) (NAGARAJAN et al., 2021).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A introdução de uma maior quantidade de substrato e inóculo (células vivas) no processo de digestão anaeróbica antes de iniciar a alimentação contínua tem o efeito de reduzir o tempo necessário para atingir o estado estacionário. Por exemplo, em uma simulação específica, quando a fração de massa de substrato é aumentada em 10% e a fração de massa de células vivas é aumentada em 60% em relação ao caso base, o estado estacionário pode ser alcançado de forma mais rápida. Sendo a produção de metano um processo complexo que depende de várias interações entre esses elementos essenciais como a taxa de crescimento celular, o consumo de nutrientes e substrato demonstrados nas figuras 1, 2 e 3.

Figura 1 – Gráfico de crescimento de células



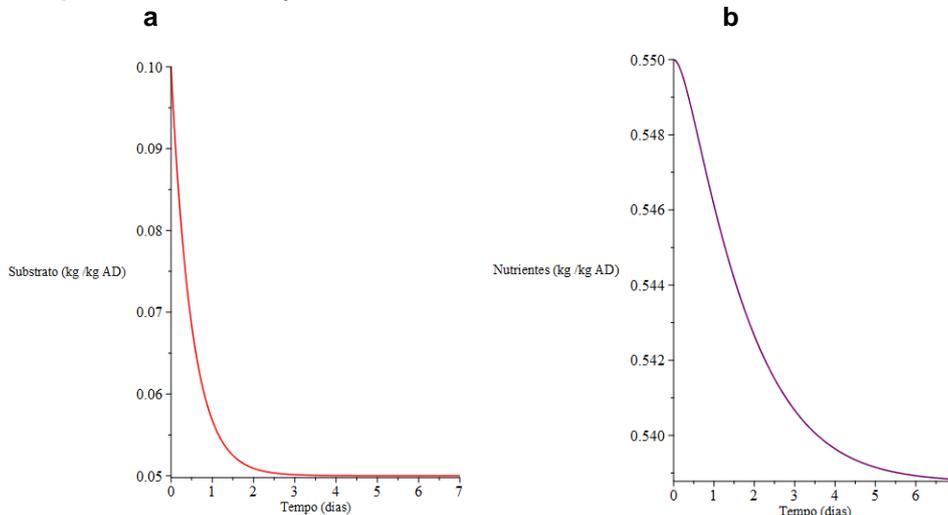
Fonte: Autoria própria.

Os resultados indicam uma grande produção de células durante o tempo destinado ao processo de produção de biogás, sendo condições favoráveis para obtenção de metano uma vez que as células metanogênicas tem a capacidade de se reproduzir neste ambiente com este substrato e potencializar o processo. Observar estas variáveis celulares desempenham um papel fundamental na produção de metano. Um aumento na taxa de crescimento específico (μ_{max}) das células resulta em uma maior taxa de produção de metano, já que as células conseguem consumir o substrato mais rapidamente. Por outro lado, uma taxa de morte celular (kd) mais alta pode diminuir a eficiência da produção de metano. (FERGUSON et al., 2016).

Através do gráfico de consumo de nutriente podemos entender como representa a variação do número de células consumindo um nutriente ao longo do tempo, oferece uma visão abrangente das dinâmicas do crescimento celular e do consumo de nutrientes. Isso permite a identificação das fases de crescimento, taxa de crescimento, eficiência na utilização de nutrientes, capacidade máxima de crescimento, e também a comparação do

comportamento celular em diferentes condições, conforme ilustrado na figura 2 (Ersahin, 2018).

Figura 2 – Gráfico: a) consumo de nutrientes b) consumo de substrato.



Fonte: Autoria própria.

Já a variação do consumo de substrato pelas células ao longo do tempo oferece uma análise abrangente do crescimento celular e do uso de recursos. Permitindo a identificação das taxas de crescimento, fases de crescimento, eficiência no consumo de substrato e o momento de exaustão do recurso. Além de possibilitar a comparação do comportamento celular em diferentes condições experimentais, a detecção de deficiências nutricionais, a determinação de parâmetros cinéticos de crescimento e a otimização de processos biotecnológicos. O gráfico da figura 3 ressalta que a composição do substrato influencia diretamente a produção de metano. Substratos mais complexos podem exigir taxas de crescimento microbiano mais altas para uma conversão eficaz em metano (NAGARAJAN; RANADE, 2019).

A produção eficiente de metano depende, portanto, de um equilíbrio adequado entre essas variáveis celulares, nutrientes e substrato. Um aumento na taxa de crescimento microbiano e uma diminuição na taxa de morte celular podem melhorar a eficiência da produção de metano. Além disso, a disponibilidade adequada de nutrientes no substrato é crucial.

CONCLUSÕES

O presente trabalho é o relatório final de um projeto de iniciação científica, que tinha como objetivo obter um melhor entendimento dos processos de digestão anaeróbica de biomassas complexas. Foi desenvolvido um modelo simples para simular este processo em batelada e contínuo, o qual se baseia em dados de testes de BMP em batelada e requer informações sobre a qualidade do biogás. O modelo foi aplicado para simular a digestão anaeróbica de bagaço de cana-de-açúcar. Os resultados simulados, como crescimento celular, taxa de consumo de nutriente e substrato, apontam uma produção específica de metano e o desempenho do digestor, trazendo benefícios para melhorar parâmetros de



produção de aumentar a escala deste digestor podendo se utilizar de maior volume de substrato.

Agradecimentos

Agradeço a Gracielle Johann e a Ana Beatriz de Oliveira Pagotto por todo suporte.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

ERSAHIN, M. E. **Modeling the dynamic performance of full-scale anaerobic primary sludge digester using Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)**. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 10, n. 41, p. 1539–1545, 23 mai. 2018.

FERGUSON, R. M. W., COULON, F., & VILLA, R. **Organic loading rate: A promising microbial management tool in anaerobic digestion**. *Water Research*, p. 348–356, 25 abr. 2016

FERRARO, A., MASSINI, G., MAZZURCO MIRITANA, V., SIGNORINI, A., RACE, M., & FABBRICINO, M. **A simplified model to simulate bioaugmented anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Biogas production efficiency related to microbiological data**. *Science of the Total Environment*, p. 885–895, 3 jul. 2019.

MENDES, L.C.; OLIVEIRA, J.S.; SILVA, J.A.; OLIVEIRA, L.C.A.; SILVA, R.C.; SILVA, R.P.; SILVA, S.R.; SANTOS, V.L. **Utilização da biomassa lignocelulósica para produção de biogás: simulação e modelagem de processos**. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 3, n. 1, p.1-12, 20 jan. 2014.

NAGARAJAN, S., PRASAD SARVOTHAMAN, V., KNÖRICH, M., & RANADE, V. V. **A simplified model for simulating anaerobic digesters: Application to valorisation of bagasse and distillery spent wash**. *Bioresource Technology*, 5 jun. 2021.

NAGARAJAN, S., & RANADE, V. V. **Pretreatment of Lignocellulosic Biomass Using Vortex-Based Devices for Cavitation: Influence on Biomethane Potential**. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 58, n. 35, p. 15975–15988, 11 ago. 2019.

NAGARAJAN, S., & RANADE, V. V. **Pre-treatment of distillery spent wash (vinasse) with vortex based cavitation and its influence on biogas generation**. *Bioresource Technology Reports*, 3 mai. 2020.