



Modelagem Computacional do Processo de Digestão Anaeróbica Simplificada no Simulador AVEVA Process Simulation

Oliveira, Y.C.A¹, Rocha, L.P¹, Freire, R.R¹², Bispo, H¹

¹Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química, Campina Grande - PB, Brasil.

²Universidade Estadual da Paraíba, Unidade Acadêmica de Energia Renováveis, Sousa - PB, Brasil.

Resumo: O aumento global na necessidade de energia e a crescente pressão para redução das emissões de poluentes destacam a urgência de encontrar soluções que promovam o desenvolvimento sustentável. Neste contexto, diversos países têm incentivado a implementação de tecnologias que promovam o aproveitamento de fontes renováveis de energia. Dentre essas, a biomassa se destaca como potencial para a produção de biogás, um substituto do metano de origem fóssil. O biogás é um dos principais produtos da digestão anaeróbica, um processo lento, instável e complexo. Neste contexto, a modelagem computacional permite a compreensão da dinâmica destas reações. Neste trabalho, foi realizada a modelagem do processo de digestão anaeróbica em batelada simples, utilizando as equações descritas no modelo de Haugen modificado, utilizando o simulador AVEVA Process Simulation. A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Experimentação Numérica de Processos (LENP) da Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Foi possível observar o perfil da concentração de microrganismos acidogênicos e metanogênicos, de sólidos voláteis biodegradáveis (SVB), de ácidos graxos voláteis, e o volume de metano produzido, ambos em função do tempo. Os resultados proporcionaram uma melhor compreensão do comportamento destas variáveis ao longo do processo.

Palavras-chave: AVEVA Process Simulation, Biogás, Modelagem Computacional.

1. Introdução

Atualmente estamos passando por um processo de transição energética e material que busca transformar resíduos, sejam líquidos ou sólidos, em produtos com valor econômico e ambiental agregado. Nesse contexto, as biorrefinarias desempenham um papel crucial na recuperação de compostos orgânicos e nutrientes inorgânicos, promovendo uma gestão mais sustentável dos resíduos. Políticas que incentivam a promoção do biogás são fundamentais para essa transformação, integrando quatro domínios essenciais: atenuação das alterações climáticas, segurança do abastecimento energético, gestão de resíduos e desenvolvimento regional (Edwards; Othman; Burn, 2015). A conversão de resíduos em energia não apenas contribui para a redução do impacto ambiental, mas também representa uma oportunidade significativa para o desenvolvimento econômico e a inovação tecnológica no setor de energia com a economia circular.

Para integrar processos que visam produzir produtos benéficos que possam substituir os recursos fósseis, as biorrefinarias utilizam tecnologias para conversão e recuperação compostos importantes tendo como matéria-prima resíduos a priori sem valor agregado. Essas instalações possuem o potencial de gerar produtos químicos que atendem a uma variedade de indústrias,



promovendo o desenvolvimento econômico local e geração de empregos. Uma tecnologia que se tornou bastante popular e econômica da biorrefinaria, utilizada em diversas estações de tratamento de águas residuais é a digestão(bio) anaeróbica. Esse processo natural envolve a decomposição do material orgânico por microorganismos na ausência de oxigênio. Entre os resíduos orgânicos processos por meio da digestão anaeróbica, destacam-se resíduos ricos em carbono orgânico, como: lodo, madeira, esterco animal, biomassa de plantas e algas, óleos e graxas, resíduos orgânicos industriais, águas residuais entre outros, convertendo-os em biogás contendo o metano (CH_4) (Bhatt; Tao, 2020; Walling; Babin; Vaneeckhaute, 2019).

Embora a produção de biogás por meio da tecnologia de digestão anaeróbica represente uma abordagem ambientalmente sustentável, existem fatores que podem impactar tanto o processo quanto os rendimentos de biogás, ocasionando desafios relacionados à complexidade tecnológica e comercial. Assim, a modelagem computacional se destaca como um componente vital na implementação eficaz das biorrefinarias, por meio da modelagem é possível simular as reações químicas e a cinética do processo, permitindo uma análise das condições operacionais ideais para o processo de gerenciamento de resíduos.

2. Fundamentação teórica

2.1 Biomassa

A biomassa está disponível em diversas formas, incluindo resíduos agrícolas, florestais e industriais. Além disso, há outras fontes de biomassa, como resíduos de processamento de alimentos, detritos municipais, resíduos provenientes de estações de tratamento de esgoto e o biogás resultante da decomposição de resíduos animais e vegetais em aterros também podem ser considerados fontes de biomassa (VALIZADEH, 2022).

Sob uma perspectiva energética, a biomassa compreende toda matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, passível de ser empregada na geração de energia. Contudo, uma parcela significativa dos resíduos orgânicos é inadequadamente tratada, o que contribui de maneira indesejável para as mudanças climáticas, principalmente em países de baixa renda, onde a reutilização de resíduos orgânicos não é uma prática comum (ORSINI, 2012).

A abundante oferta de biomassa como fonte de energia no Brasil está principalmente associada a sistemas integrados de produção agrícola, agroindustrial e silvicultural. O país possui um vasto potencial para aproveitar essa biomassa como fonte de energia. Suas condições naturais e geográficas favoráveis, juntamente com uma grande extensão de terras agricultáveis e condições climáticas propícias, o colocam em uma posição privilegiada para liderar a agricultura voltada para energia (SANTOS et al., 2017).

Ademais, os resíduos urbanos e industriais constituem a maior fonte de biomassa devido ao grande aumento populacional e consequentemente o consumo excessivo das últimas décadas, gerando toneladas diárias de lixo, incluindo plásticos, vidro, metais e resíduos orgânicos. No Brasil, em 2008, eram geradas 169.659 toneladas diárias de lixo, muitas das quais eram descartadas em "lixões", causando danos ambientais graves, como doenças e contaminação do solo e água. Atualmente, há soluções, como a biodigestão anaeróbia, que não apenas reduzem a poluição, mas também geram energia na forma de biogás e fertilizantes (CARDOSO, 2012; TAKAMI, et al., 2020)



Portanto, considerando que a biomassa é uma fonte renovável capaz de alcançar baixas ou mesmo nulas emissões de carbono, desde que a tecnologia de conversão adequada seja empregada e as matérias-primas sejam gerenciadas de maneira sustentável, a crescente dependência da biomassa em aplicações modernas é vista como desempenhando um papel crucial na transição para sistemas energéticos mais sustentáveis (ORSINI, 2012).

Enquanto a queima de combustíveis fósseis contribui para o elevado aumento do CO₂ na atmosfera, o uso da biomassa como fonte de energia tem um efeito oposto, não resultando em aumento de CO₂. O biogás, em particular, é altamente benéfico, pois utiliza o CO₂ como oxidante na produção de hidrogênio durante a reação de reforma do metano (GÊNERO, 2013).

2.2 Biodigestão anaeróbica

A digestão anaeróbica é vista como uma alternativa relevante para o tratamento de diferentes tipos de resíduos, especialmente aqueles com altos níveis de matéria orgânica, sendo um processo biológico natural que ocorre na ausência de oxigênio, no qual a matéria orgânica é transformada em uma mistura gasosa. Esse processo envolve um consórcio complexo de microrganismos, incluindo bactérias e arqueias, que, de maneira colaborativa, convertem a matéria orgânica em biogás (FUESS, 2017; MENDONÇA, 2023).

O biogás, que é o principal subproduto gerado pela biodigestão anaeróbica, pode ser aproveitado para a produção de calor, eletricidade, injeção em redes de gás natural e também para fins industriais. A biodigestão anaeróbica transforma grandes quantidades de substrato, resultando no biogás e no digestato, que oferece nutrientes para as plantas e enriquece a matéria orgânica presente no solo (GHODRAT et al., 2018; MENDONÇA 2023).

Esta mistura gasosa, conhecida como biogás, é composta principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), além de menores quantidades de hidrogênio (H₂), nitrogênio (N₂) e sulfeto de hidrogênio (H₂S). Devido à presença de metano, o biogás possui um grande potencial energético (FUESS, 2017).

O processo de biodigestão anaeróbica composto por quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Cada uma dessas fases é conduzida por distintos grupos de microrganismos que atuam em sintrofia, podendo demandar condições ambientais específicas para ocorrerem (AMARAL et al., 2019).

2.3 Acidogênese

Na fase de acidogênese, também chamada de fermentação ácida, compostos orgânicos solúveis simples resultantes da fase de hidrólise são absorvidos e metabolizados pelas bactérias fermentativas acidogênicas. Essas bactérias produzem compostos como ácidos orgânicos (acético, propiônico e butírico), álcoois, cetonas, dióxido de carbono e hidrogênio. Esses compostos, de alta solubilidade, servem como fontes de alimento para bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas nas próximas etapas da biodigestão anaeróbica. (ABREU, 2007; CHERNICHARO, 2007; SILVA, 2017).

2.4 Metanogênese



Na fase final do processo de digestão anaeróbica, participam dois grupos de microrganismos metanogênicos: os acetoclásticos e os hidrogenotróficos. O primeiro grupo utiliza o acetato como fonte de carbono e energia, liberando dióxido de carbono e metano. Já o segundo grupo usa o hidrogênio como fonte de energia e o dióxido de carbono como fonte de carbono e receptor final de elétrons, de forma que tanto o hidrogênio quanto parte do dióxido de carbono são convertidos em metano (CHERNICHARO, 2016; HELENAS 2019).

3. Metodologia

Este estudo objetiva a implementação de um modelo simplificado para o processo de digestão anaeróbica utilizando o *software AVEVA Process Simulation*. Devido à complexidade do modelo amplamente utilizado na modelagem deste tipo de reação, o *Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1)*, adotou-se o modelo de Haugen (2013), em virtude de sua abordagem simplificada, que ao reduzir o esforço computacional sem comprometer a precisão necessária para as primeiras simulações da pesquisa, auxilia no estudo inicial dos mecanismos reacionais.

Para o desenvolvimento do referido trabalho foi utilizada a estrutura de computadores e o software de simulação de processos *AVEVA Process Simulation*, disponível no Laboratório de Experimentação Numérica de Processos (LENP), da Unidade Acadêmica de Engenharia Química, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

3.1 Modelagem Matemática do processo

O processo de digestão anaeróbica envolve uma gama de reações bioquímicas de alta complexidade. O modelo adotado neste trabalho, proposto por Haugen (Hill modificado), considera somente duas etapas, a acidogênica e metanogênica, representadas pelas seguintes equações:

$$\frac{dS_{SVB}}{dt} = -\mu k_1 X_{ACID} \quad (1)$$

$$\frac{dS_{SVB}}{dt} = -\mu k_1 X_{ACID} \quad (2)$$

$$\frac{dS_{AGV}}{dt} = \mu k_2 X_{ACID} - \mu_c K_3 X_{MET} \quad (3)$$

$$\frac{dX_{ACID}}{dt} = (\mu - K_D) X_{ACID} \quad (4)$$

$$\frac{dX_{MET}}{dt} = (\mu_c - K_{DC}) X_{MET} \quad (5)$$

$$F_{MET} = \mu_c k_5 X_{MET} \quad (6)$$



Onde:

S_{SVB} = concentração de sólidos voláteis biodegradáveis;

S_{AGV} = concentração de ácidos graxos voláteis;

X_{ACID} = concentração de bactérias acidogênicas;

X_{MET} = concentração de arqueia metanogênicas;

F_{MET} = vazão de metano;

μ = taxa específica de crescimento de bactérias acidogênicas;

μ_c = taxa específica de crescimento de arqueias metanogênicas;

K_D = taxa de mortalidade das bactérias acidogênicas;

K_{DC} = taxa de mortalidade das arqueias metanogênicas;

Sendo,

$$\mu = \mu_m \left(\frac{S_{SVB}}{K_S + S_{SVB}} \right) \quad (7)$$

$$\mu_c = \mu_{mc} \left(\frac{S_{AGV}}{K_{SC} + S_{AGV} + \frac{S_{AGV}^2}{K_{imAGV}}} \right) \quad (8)$$

Onde:

K_{imAGV} = constante de inibição por ácidos graxos voláteis (AGV) na etapa metanogênica;

K_S = constante de saturação para a acidogênese

K_{SC} = constante de saturação para a metanogênese;

Os valores dos parâmetros utilizados e as condições iniciais utilizadas na modelagem do processo seguem descritos, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2.



Tabela 1 – Parâmetros utilizados na modelagem do processo.

Parâmetro	Valor	Unidade
k_1	3,89	g de SVB/ g de SV acidogênicas
k_2	1,76	g de AGV/ g de SV acidogênicas
k_3	31,7	g de AGV/ g de SV metanogênicas
k_5	26,3	L de CH_4 /(g de SV metanogênicas/L)
K_S	15,5	g de SVB/L
K_{SC}	3,0	g de AGV/L
K_D	0,02	1/d
K_{DC}	0,02	1/d
μ_m	0,261	1/d
μ_{mc}	0,261	1/d
k_{imAGV}	1,68	g de AGV/L

Fonte: Haugen, 2013.

Tabela 2 – Condições iniciais utilizadas na modelagem do processo.

Variável	Valor	Unidade
S_{SVB}	14,44	g de SVB/L
S_{AGV}	3,44	g de AGV/L
X_{ACID}	26,45	g de SV acidogênicas/L
X_{MET}	26,45	g de SV metanogênicas/L

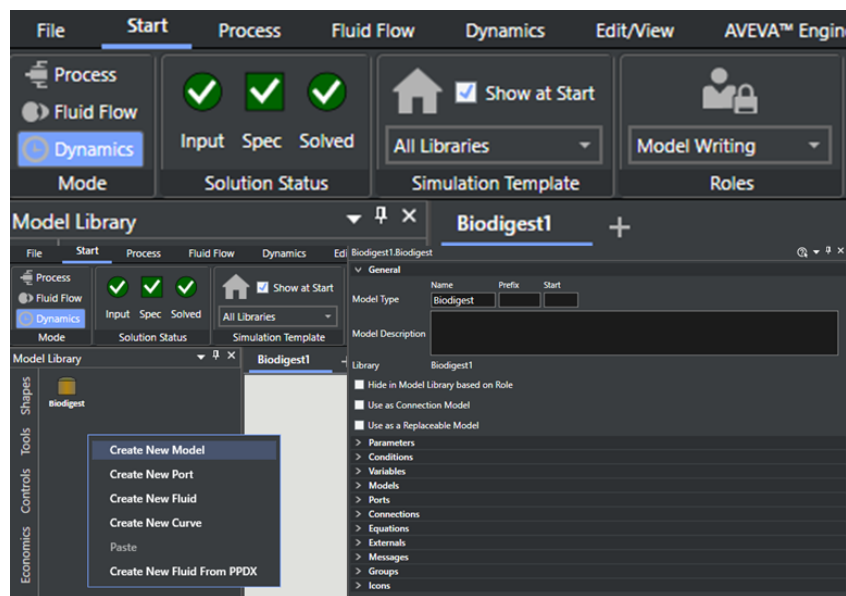
Fonte: Haugen, 2013.

3.2 Aveva Simulation

Para a implementação do modelo no Aveva Process simulation, foi utilizada inicialmente uma nova simulação, renomeada de (Biodigest1). Em seguida, fez-se necessário a ativação do “Model Writing”, que possibilita a modelagem de novos processos por meio da opção “Create New Model”, tornando possível a representação do processo simplificado de biodigestão anaeróbica proposto por Haugen. Conforme Imagem 1.



Figura 1 – Primeiros passos para criação de um modelo no AVEVA Process Simulation.



Fonte: Dos Autores, 2024.

O primeiro passo para a inserção das equações foi definir os parâmetros representados na Tabela 1 na aba “*Parameters*”, conforme Figura 2.

Figura 2 – Interface de inserção dos parâmetros necessários para o modelo.

Name	Status	Type	Units	★	!	↑	↓	Default	Dim	Min	Max	Values	Group	Des
k1	●	Real	☆	!	↑	↓	↑	3.89		-1E+6	1E+6			
k2	●	Real	☆	!	↑	↓	↑	1.76		-1E+6	1E+6			
k3	●	Real	☆	!	↑	↓	↑	31.7		-1E+6	1E+6			
k_d	●	Real	☆	!	↑	↓	↑	0.02		-1E+6	1E+6			
k_dc	●	Real	☆	!	↑	↓	↑	0.02		-1E+6	1E+6			
k5	●	Real	☆	!	↑	↓	↑	26.3		-1E+6	1E+6			
mu_m	●	Real	☆	!	↑	↓	↑	0.261		-1E+6	1E+6			
ks	●	Real	☆	!	↑	↓	↑	15.5		-1E+6	1E+6			
mu_mc	●	Real	☆	!	↑	↓	↑	0.261		-1E+6	1E+6			
ksc	●	Real	☆	!	↑	↓	↑	3		-1E+6	1E+6			
k_imAGV	●	Real	☆	!	↑	↓	↑	1.68		-1E+6	1E+6			

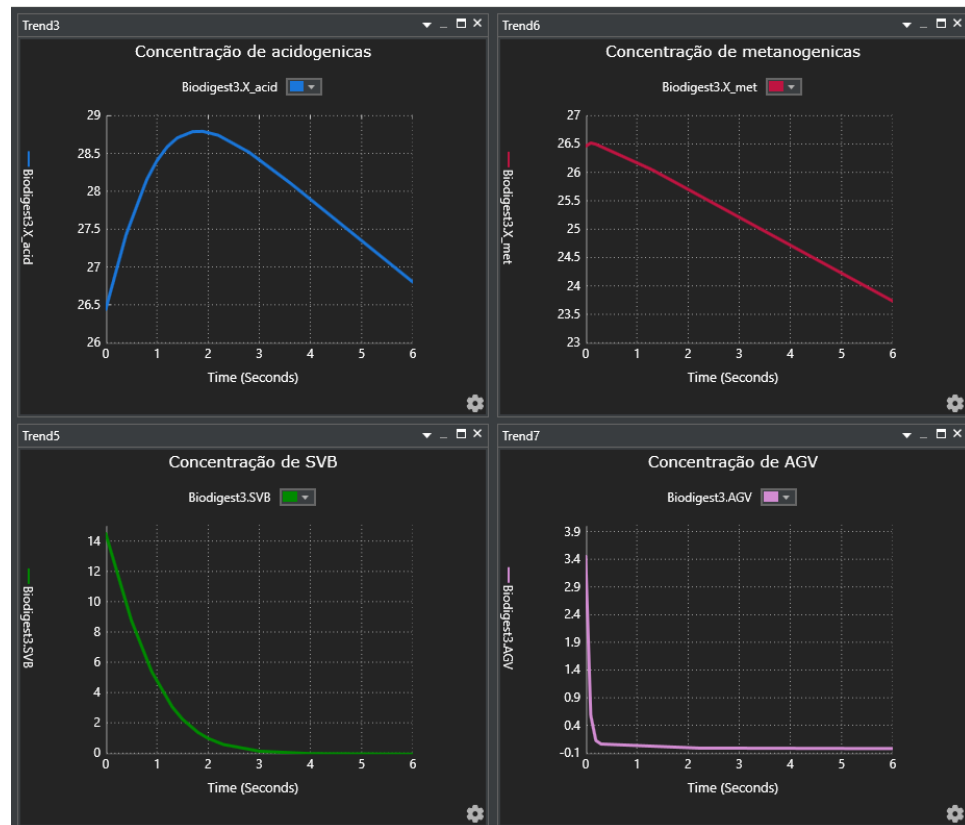
Fonte: Dos Autores, 2024.

Como segundo passo, fez-se necessário a definição de todas as variáveis utilizadas no modelo na aba “*Variables*”, bem como os valores iniciais de SVB, AGV, A_{ACID} e X_{MET} como padrão no “*Default*”, conforme Figura 3.



metanogênicas, de sólidos voláteis biodegradáveis e de ácidos graxos voláteis. Os resultados seguem representados na Figura 5.

Figura 5 – Perfis de concentração obtidos como resposta do modelo.



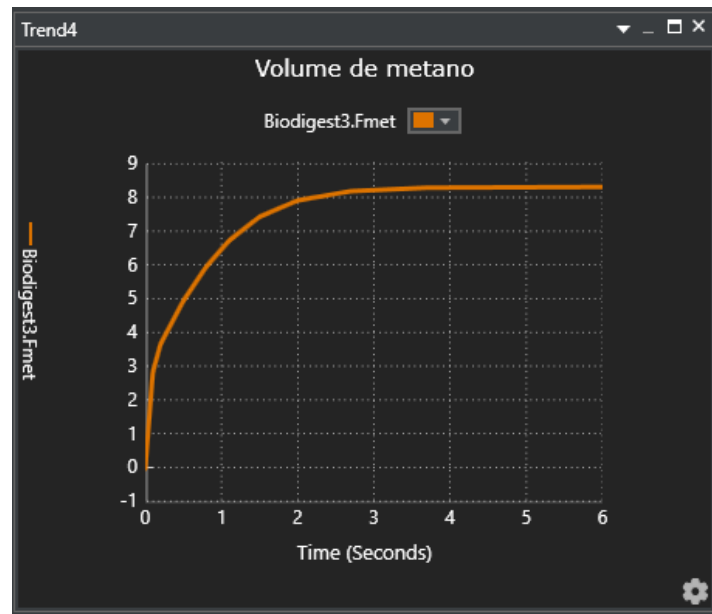
Fonte: Dos Autores, 2024.

A partir da análise dos resultados da Figura 5, é possível perceber que a curva de concentração de bactérias acidogênicas apresenta um perfil inicial de crescimento até atingir um valor máximo e logo após adquire um perfil de decaimento. Importante destacar que este ponto de mudança ocorre devido à queda na concentração de sólidos voláteis biodegradáveis. A concentração de arqueias metanogênicas por sua vez apresentaram um perfil decrescente e houve um rápido consumo de ácidos graxos voláteis.

Além disto, no gráfico da Figura 6 foi possível observar também o volume de metano produzido, alcançando um valor próximo ao encontrado por Siqueira (2021) em seu trabalho.



Figura 6 – Volume de metano produzido durante o processo.



Fonte: Dos Autores, 2024.

5. Conclusões

Os resultados validaram a aplicabilidade do modelo proposto por Haugen (2013) como uma alternativa confiável e menos complexa para o estudo da digestão anaeróbica. A escolha por um modelo mais simples permitiu uma análise inicial do processo com menor esforço computacional. A simulação conduzida no programa AVEVA Process Simulation reproduziu de maneira eficaz as ações previstas do sistema, como a geração de metano e a dinâmica dos microrganismos presentes no processo.

6. Agradecimentos

Agradecemos ao Laboratório de Experimentação Numérica de Procesos (LENP) e a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pelo suporte e infraestrutura disponibilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro que tornou possível a realização deste estudo. E à AVEVA, pela disponibilização do AVEVA Process Simulation, ferramenta indispensável para a modelagem e simulação deste processo.



7. Referências bibliográficas

ABREU, E. F. **Estudo da diversidade microbiana metanogênica em reatores UASB tratando esgoto sanitário**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da IFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2007.

AMARAL, André Cestonaro; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; KUNZ, Airton. **O processo de biodigestão**. 2019.

BHATT, Arpit H.; TAO, Ling. **Economic Perspectives of Biogas Production via Anaerobic Digestion**. Bioengineering, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 74, 2020.

CARDOSO, B. M. **Uso da Biomassa Como Alternativa Energética**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2012.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípio do tratamento biológico de águas residuárias**. Reatores anaeróbicos, v. 5, 2ª edição, Belo Horizonte: Ed. UFMG, 380p. 2007.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípio do tratamento biológico de águas residuárias**. Reatores anaeróbicos, v. 5, 2ª edição, Belo Horizonte: Ed. UFMG, 379p. 2016.

EDWARDS, Joel; OTHMAN, Maazuza; BURN, Stewart. **A review of policy drivers and barriers for the use of anaerobic digestion in Europe, the United States and Australia**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [s. l.], v. 52, p. 815–828, 2015.

FUESS, L. T. **Potencial contaminante e energético da vinhaça: riscos de contaminação no solo e recursos hídricos e recuperação de energia a partir da digestão anaeróbia**. Dissertação – Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 2013.

GÊNERO, Laira Cristina et al. **Produção de hidrogênio a partir do biogás**. Acta Iguazu, v. 2, n. 1, p. 29-42, 2013.

GHASEMI GHODRAT, Alireza et al. **Waste management strategies; the state of the art. Biogas: Fundamentals, Process, and Operation**, p. 1-33, 2018.

HAUGEN, F., BAKKE, R., LIE, B. "Adapting dynamic mathematical models to a pilot anaerobic digestion reactor". **Modeling, Identification and Control**, v. 34, n. 2, p. 35–54, 2013. DOI: 10.4173/mic.2013.2.1.

HELENAS, J. K. **Biodigestão anaeróbia de resíduos alimentares visando a produção de metano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina. 2019.



MENDONÇA, Nayara Fernandes de. **Avaliação dos impactos ambientais associados à inserção do sistema de biodigestão anaeróbica ao processamento da vinhaça em biorrefinarias de cana-de-açúcar.** 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ORSINI, Rosely dos Reis. **Estudo do aproveitamento do resíduo da lavoura cafeeira como fonte de biomassa na produção de hidrogênio.** 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SANTOS, GUILHERME HENRIQUE FÁVERO; DO NASCIMENTO, RAPHAEL SANTOS; ALVES, GEZIELE MUCIO. **Biomassa como energia renovável no Brasil.** Uningá Review, v. 29, n. 2, 2017.

SILVA, D. H. D. **Fatores que influenciam a biodigestão anaeróbia no processo de produção de biogás.** 2017.

SIQUEIRA, Diane Frauches. **Modelagem de Biodigestor para Produção de Biogás a Partir de Resíduos Lignocelulósicos.** Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2021.

TAKAMI, Marcelo Hideo de Freitas; OLIVEIRA, Edmar. **Fonte de geração de energia com biomassa.** 2020.

VALIZADEH, Soheil et al. **Valorization of biomass through gasification for green hydrogen generation: A comprehensive review.** Bioresource technology, p. 128143, 2022.

WALLING, Eric; BABIN, Alexandre; VANEECKHAUTE, Céline. Nutrient and Carbon Recovery from Organic Wastes. In: BASTIDAS-OYANEDEL, Juan-Rodrigo; SCHMIDT, Jens Ejbye (org.). **Biorefinery: integrated sustainable processes for biomass conversion to biomaterials, biofuels, and fertilizers.** Cham: Springer, 2019.