



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
INSTITUTO DE QUÍMICA ARARAQUARA – SP

VITOR LUIS BATISTELA

POTENCIALIDADES ENERGÉTICAS E AMBIENTAIS DO USO DE
GLICEROL COMO CO-SUBSTRATO EM PROCESSOS DE CO-
DIGESTÃO ANAERÓBIA

ARARAQUARA

2022

VITOR LUIS BATISTELA

POTENCIALIDADES ENERGÉTICAS E AMBIENTAIS DO USO DE
GLICEROL COMO CO-SUBSTRATO EM PROCESSOS DE CO-
DIGESTÃO ANAERÓBIA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao Instituto de Química –
Unesp/Araraquara, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Químico.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Lorena Oliveira
Pires

ARARAQUARA - SP
2022

VITOR LUIS BATISTELA

POTENCIALIDADES ENERGÉTICAS E AMBIENTAIS DO USO DE GLICEROL
COMO CO-SUBSTRATO EM PROCESSOS DE CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao Instituto de Química –
Unesp/Araraquara, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Químico.

Araraquara, 04 de agosto de 2022

BANCA EXAMINADORA

DocuSigned by:

Lorena Oliveira Pires

F14E7E8636AE4A0...

Prof^a. Dr^a. Lorena Oliveira Pires

Instituto de Química / UNESP Araraquara

DocuSigned by:

Elias de Souza Monteiro Filho

A97CBB243EAD452...

Prof. Dr. Elias de Souza Monteiro Filho

Instituto de Química / UNESP Araraquara

DocuSigned by:

Ossamu Hojo

35074178DD2841A...

Prof. Dr. Ossamu Hojo

Instituto de Química / UNESP Araraquara

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Química da Universidade Estadual Paulista (UNESP) que me proporcionou a realização deste curso de graduação de forma pública, gratuita e com qualidade.

À minha professora orientadora Profa. Dra. Lorena Oliveira Pires pela orientação, compreensão e paciência durante toda a orientação deste trabalho, além de ter me lecionado disciplinas indispensáveis para minha atuação profissional.

À minha família pelo simples fato de existir, me acompanhar, me acolher e me amparar de todas as formas durante este curso de graduação e todos os eventos relacionados. Em especial aos meus pais e irmãos, por entenderem minha ausência durante este período.

À minha namorada que esteve sempre ao meu lado e me apoiou de diversas formas ao longo da graduação, sendo fundamental para que eu pudesse manter o foco e cumprir com os objetivos deste trabalho. Aos meus amigos de graduação que compartilharam comigo os sucessos e revezes enfrentados durante o curso.

Aos meus irmãos da república ATC que me acolheram e foram meu lar durante todo o curso de graduação, compartilhando comigo de momentos indescritíveis e que em situações de adversidade, se posicionaram, me ensinando muito sobre a vida.

À entidade Enactus Unesp Araraquara e ao Projeto Rondon, em especial ao Prof. Roberto Carlos Miguel, por me revelarem o dever social que está atrelado à formação humana de um engenheiro químico, me levando a tentar contribuir para um mundo mais justo e equilibrado nas esferas sociais, econômicas e ambientais.

Por fim, ao meu psicólogo que me ajudou a me conhecer, respeitar meus limites e valorizar minhas habilidades, sendo fundamental para que eu conseguisse enfrentar os desafios relacionados ao fim da graduação, além de fazer parte de todas as conquistas que realizei durante este período.

RESUMO

A utilização de biodiesel na matriz energética brasileira, incentivada pelo governo federal por meio do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel, apresenta um aumento de produção desde sua origem, em 2004, até projeções para 2023. Esta produção está diretamente ligada à geração de glicerol bruto, subproduto da produção de biodiesel pelo processo de transesterificação, considerado como químico residual devido à sua alta oferta no mercado brasileiro frente à demanda pela substância. Este trabalho busca analisar alternativas para a reutilização deste resíduo por meio do seu emprego como co-substrato em processos de co-digestão anaeróbia a fim de aumentar a produtividade de processos tradicionais de digestão de resíduos agroindustriais, como a vinhaça e orgânicos como resíduo alimentar e/ou esgoto sanitário. Além dos materiais que podem ser empregados neste processo, diferentes configurações operacionais (razões entre substrato, temperatura, volume de trabalho, tipo de reator) são estudadas, com o objetivo de categorizar e explicitar a viabilidade deste tipo de processo em escala industrial. Diante disto, observa-se que o emprego de glicerol como co-substrato em processos de digestão anaeróbia tradicional aumenta a produtividade destes em termos da geração de biogás (metano e/ou hidrogênio), porém demanda-se atenção em relação à concentração limitante do tóxico por inibição da atividade fermentativa dos microrganismos envolvidos no processo. Esta geração gasosa possibilita a geração de energia em forma de eletricidade e/ou calor, de forma a contribuir com a matriz energética brasileira e impactar positivamente em aspectos ambientais relacionados ao descarte incorreto do glicerol em vias fluviais.

Palavras-Chave: Reator biológico; Biogás; Resíduo alimentar; Vinhaça; Metano.

ABSTRACT

The use of biodiesel in the Brazilian energy matrix, encouraged by the federal government through the National Program for Biodiesel Production and Use, presents an increase in production since its origin, in 2004, until projections for 2023. This production is directly linked to the generation of crude glycerol, a byproduct of biodiesel production through the transesterification process, considered a residual chemical due to its high availability in the Brazilian market compared to the demand for the substance in the country. This work seeks to analyze alternatives for the reuse of this waste through its use as a co-substrate in anaerobic co-digestion processes in order to increase the productivity of traditional processes of agroindustrial waste digestion, such as vinasse and organic waste such as food waste and/or sewage. Besides the materials that can be employed in this process, different operational configurations (substrate ratios, temperature, working volume, type of reactor) are studied, with the objective of categorizing and explaining the feasibility of this type of process on an industrial scale. The use of glycerol as a co-substrate in traditional anaerobic digestion processes increases their productivity in terms of biogas generation (methane and/or hydrogen), but attention is required in relation to the limiting concentration of the toxic by inhibiting the fermentative activity of the microorganisms involved in the process. This gas generation enables the generation of energy through electricity and/or heat, in order to contribute to the Brazilian energy matrix and positively impact environmental aspects related to the incorrect disposal of glycerol in waterways.

Keywords: Biological reactor; Biogas; Food waste; Vinasse; Methane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de biodiesel diária no mundo em 2019	11
Figura 2 - Equação geral para transesterificação de triglicerídeos	12
Figura 3 - Volume de glicerol exportado pelo Brasil entre 2010 e 2020	12
Figura 4 - Volume de glicerol gerado a partir da produção de biodiesel no Brasil de 2010 até 2019	13
Figura 5 - Volume de Biodiesel produzido no Brasil de 2010 até 2019	13
Figura 6 - Comparativo entre a quantidade de glicerol gerada a partir do biodiesel, quantidade exportada e excedente no Brasil de 2010 até 2019	14
Figura 7 - Etapas da fermentação anaeróbia para produção de metano	16
Figura 8 - Reator batelada com jaqueta dupla.....	29
Figura 9 - Montagem experimental no ensaio do Potencial bioquímico de hidrogênio (PBH)	30
Figura 10 - Aparato experimental para testes do potencial bioquímico de metano (PBM) com um sistema de coleta de biogás	31
Figura 11 - Uma unidade CSTR básica com agitação mecânica	31
Figura 12 - Diagrama esquemático de dois reatores anaeróbios CSTR em série	33
Figura 13 - Conceito operacional do reator tradicional UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)	34
Figura 14 - Aparato do reator UASB.....	35
Figura 15 - Esquema da instalação experimental em escala de laboratório do reator UASB	36
Figura 16 - Geração de energia (MW) a partir do biogás por UF em 2020	37
Figura 17 - Objetivos de desenvolvimento sustentável ONU (Agenda 2030)	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química típica do biogás16

Tabela 2 - Capacidade diária de plantas do estado de SP autorizadas pela ANP para produção de biodiesel no país, 2021.....36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Definições dos tipos de esgoto sanitário	19
Quadro 2 - Quadro comparativo de trabalhos de co-digestão entre GB e RA.....	24
Quadro 3 - Quadro comparativo de trabalhos de co-digestão entre GB e VN.....	26
Quadro 4 - ODSs e metas que podem ser contempladas pelo uso de GB em geração de energia	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas;

CH₄ - Metano;

CO₂ - Dióxido de Carbono;

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio;

DQO - Demanda Química de Oxigênio;

EB - Esterco Bovino;

EPE - Empresa de Pesquisa Energética;

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto;

FOC - Farinha de Ossos e Carne;

GB - Glicerol Bruto;

GP - Glicerol Purificado;

H₂ - Hidrogênio;

N - Nitrogênio;

N₂ - Gás Nitrogênio;

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável;

PBH - Potencial Bioquímico de Hidrogênio;

PBM - Potencial Bioquímico de Metano;

RA - Resíduo Alimentar;

ST - Sólidos Totais;

SV - Sólidos Voláteis;

TDH - Tempo de Detenção Hidráulica;

VN - Vinhaça Citrícola.

SUMÁRIO

Enunciado do Problema	11
1. Biodiesel.....	11
1.1 Glicerol.....	12
2. Objetivos	14
Desafios Científicos e Tecnológicos.....	15
3. Digestão anaeróbia	15
3.1 Biogás	16
4. Substratos e inóculos para co-digestão	17
4.1 Resíduo alimentar	18
4.2 Vinhaça citrícola.....	19
4.3 Esgoto sanitário	19
5. Co-digestão de glicerol com resíduo alimentar	21
6. Co-digestão de glicerol com vinhaça citrícola	25
7. Alternativas de reatores para co-digestão anaeróbia.....	28
7.1 Reator em batelada	29
7.2 Reator CSTR	31
7.3 Reator UASB	34
8. Potencialidades em geração energética e impactos ambientais.....	36
9. Conclusão	41
10. Referências	43

Enunciado do Problema

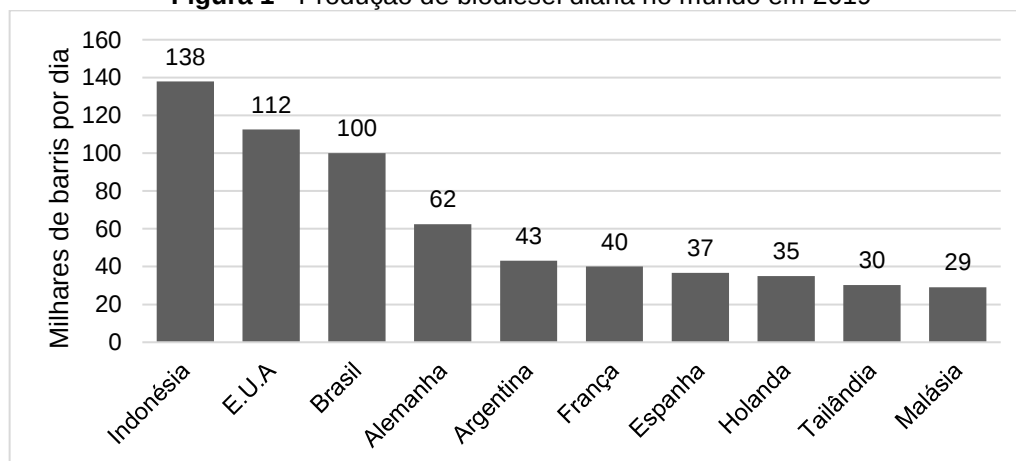
1. Biodiesel

O Biodiesel é um combustível produzido a partir de fontes renováveis como gorduras animais ou óleos vegetais. As espécies vegetais comumente utilizadas são girassol, amendoim, mamona e pinhão manso, com destaque para a soja no cenário brasileiro (MINFRA, 2020).

O seu uso na matriz energética brasileira teve origem em 2004 com o lançamento do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) pelo governo federal, que visa introduzir o biodiesel na formulação do diesel fóssil. De experimento, a mistura tornou-se legalmente obrigatória em 2008 (Lei nº 11.097/2005) com o percentual de 2% de biodiesel. Este percentual foi aumentado conforme a realidade do mercado até atingir o valor de 12% em 2020 (MINFRA, 2020), com projeção de 15% até 2023 (EPE, 2021).

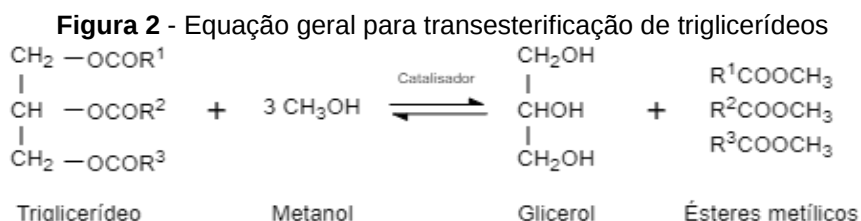
Em 2019, o Brasil foi o terceiro maior produtor de biodiesel mundial, com uma produção diária de 99,95 milhares de barris por dia, ficando atrás somente da Indonésia e dos Estados Unidos da América, como mostra a Figura 1 (EIA, 2019).

Figura 1 - Produção de biodiesel diária no mundo em 2019



Fonte: Adaptado de: International Energy Data, Monthly Update. U.S. Energy Information Administration (EIA), 2019.

O biodiesel é um composto de ésteres de ácidos graxos, produtos de uma reação de transesterificação de uma molécula de triglicerídeo (GERIS *et al.*, 2007). A Figura 2 exibe a reação de transesterificação, utilizada na produção de biodiesel.



Fonte: Adaptado de: TAPANES *et al.*, 2007.

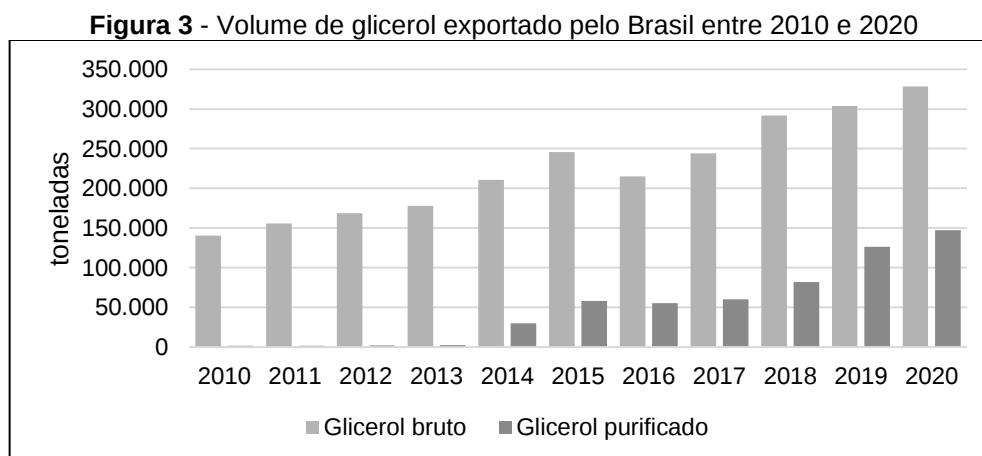
A reação de transesterificação tem como produtos o biodiesel (produto desejado) e o glicerol (subproduto).

1.1 Glicerol

O 1,2,3-Propanotriol, também chamado de glicerol, é um álcool com três hidroxilas e é produzido pelo corpo humano em forma de metabólito (NCBI, 2021). Em escala industrial, o glicerol é gerado como subproduto (10% em massa) da produção de biodiesel. Apesar das diversas aplicações possíveis para o glicerol, como produtos farmacêuticos, cosméticos, uso em resinas, etc, esta substância é vista como resíduo de baixo valor agregado, devido à sua alta oferta (PAGLIARO *et al.*, 2007).

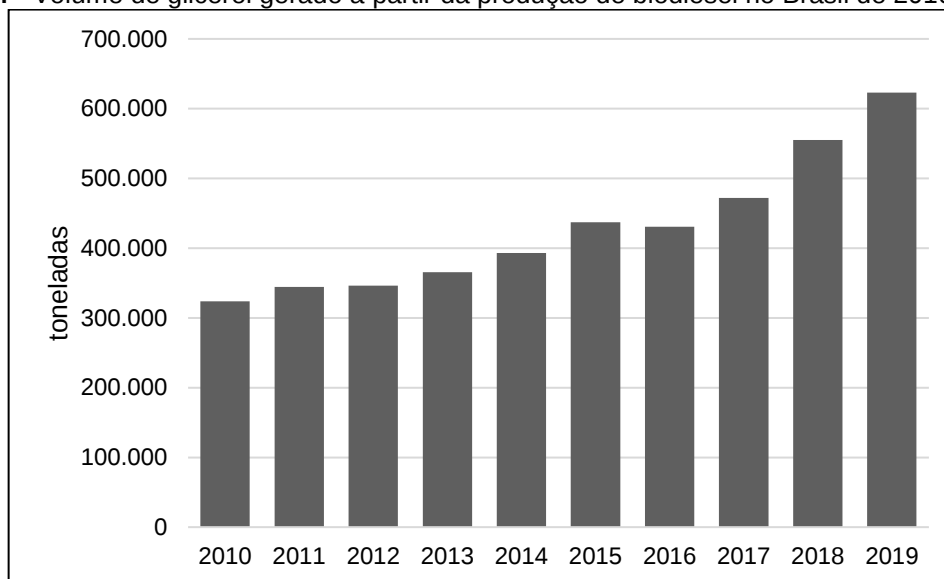
Uma alternativa para reduzir a quantidade excedente do glicerol produzida no país, é a purificação e consequente exportação (com destaque para demanda de países asiáticos) como matéria prima a ser empregada em alimentos, ração animal, cosméticos e farmacêuticos (NOVI *et al.*, 2018).

A Figura 3 exibe os volumes de glicerol bruto (GB) e purificado exportados pelo Brasil no período de 2010 a 2020 (MDIC, 2020).

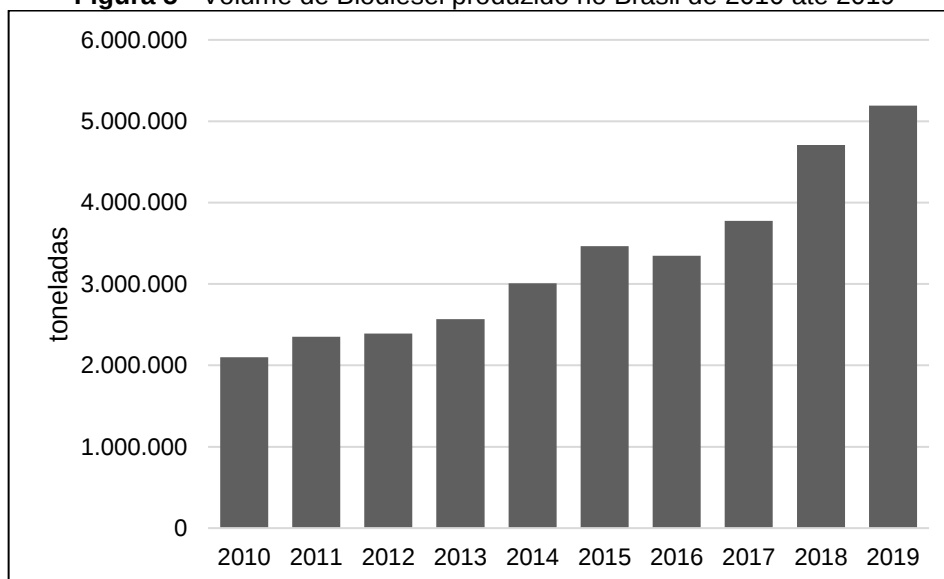


Fonte: Adaptado de: MDIC. Dados do Comércio Exterior, 2020.

O volume de glicerol gerado na produção de biodiesel no país tem apresentado comportamento crescente, acompanhando proporcionalmente a produção de biodiesel, como exibem a Figura 4 e a Figura 5 respectivamente (ANP, 2020).

Figura 4 - Volume de glicerol gerado a partir da produção de biodiesel no Brasil de 2010 até 2019

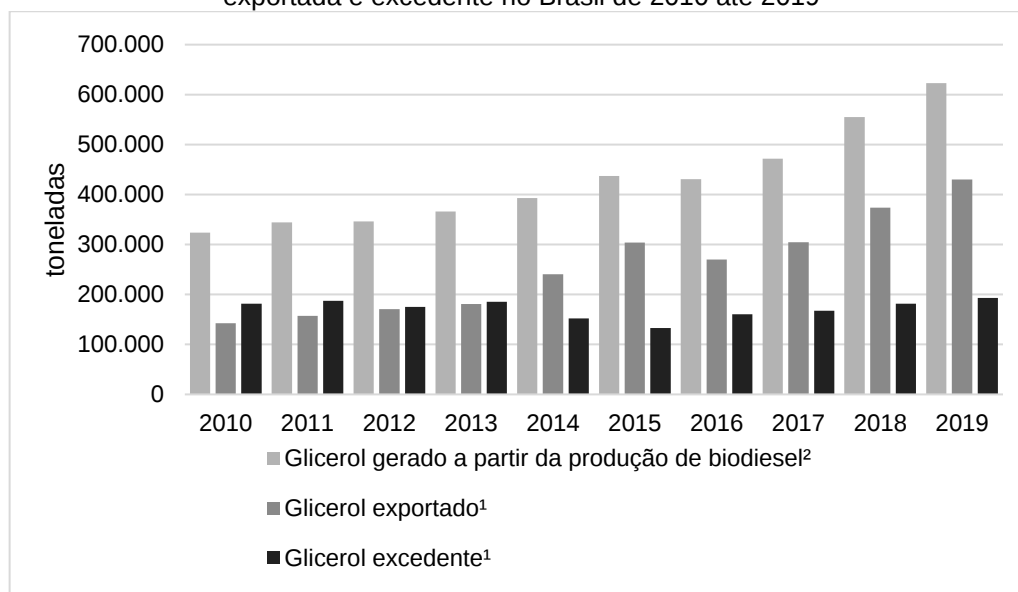
Fonte: Adaptado de: ANP. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2019, p.195, 2020.

Figura 5 - Volume de Biodiesel produzido no Brasil de 2010 até 2019

Fonte: Adaptado de: ANP. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2019, p.195, 2020.

Ao considerar a diferença entre a quantidade de glicerol gerado e o total que é exportado, como mostra a Figura 6, percebe-se que uma quantidade relevante deste subproduto é mantida no país, que, em parte é absorvida pela indústria e em parte é descartada.

Figura 6 - Comparativo entre a quantidade de glicerol gerada a partir do biodiesel, quantidade exportada e excedente no Brasil de 2010 até 2019



Fonte: 1: Adaptado de: MDIC. Dados do Comércio Exterior, 2020. 2: Adaptado de: ANP. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2019, p.195, 2020.

Por conta dos órgãos ambientais no país apresentarem certa dificuldade em acompanhar a demanda por fiscalização, este aumento da geração de glicerol pode acarretar o aumento do produto descartado de maneira incorreta, gerando impactos ambientais graves, como contaminação de solo e efluentes (NOVI *et al.*, 2018).

Uma alternativa para minimização dos problemas relacionados ao descarte incorreto é o emprego do processo de digestão anaeróbia, com o objetivo de degradar o glicerol obtendo 1,3-propanidíol e biogás, que pode ser utilizado para geração de energia elétrica por meio de sua combustão. Em conjunto ao glicerol, pode-se empregar outros resíduos orgânicos (co-substratos), a fim de aumentar a conversão da reação exibida na Figura 2, sendo este processo chamado de co-digestão anaeróbia (RODRIGUES *et al.*, 2021).

2. Objetivos

O objetivo geral do trabalho consiste em avaliar as potencialidades do uso de glicerol residual em processos de co-digestão anaeróbia, comparando a geração gasosa obtida em diferentes trabalhos científicos. Esse objetivo geral se desdobra nos seguintes objetivos específicos:

- Analisar trabalhos sobre digestão anaeróbia, biogás, substratos e/ou inóculos, categorizando-os de acordo com co-substratos adicionados;

- Compreender as alternativas de configurações de reatores e processos, esquematizando as produtividades de biogás e metano além da redução de DQO;
- Aplicar o uso do glicerol como co-substrato para geração energética por meio da produção de biogás, demonstrando a redução de impactos ambientais relacionados ao seu descarte incorreto.

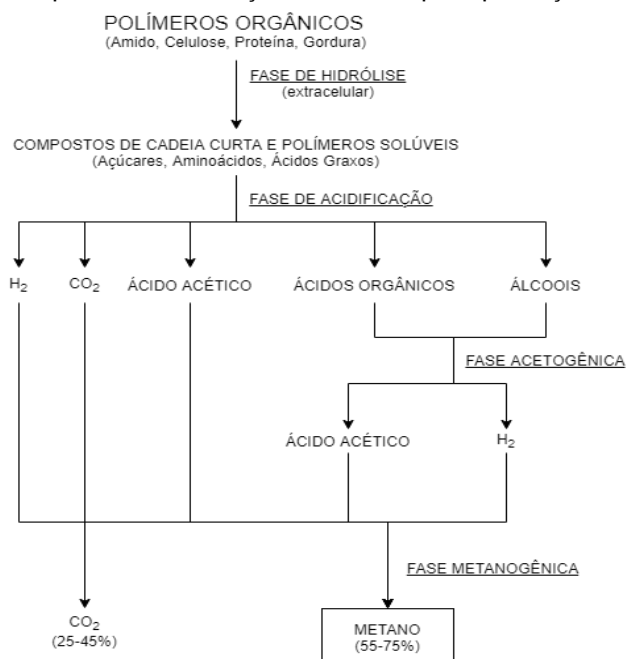
Desafios Científicos e Tecnológicos

3. Digestão anaeróbia

“A digestão anaeróbia é um processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio livre, no qual diversas populações de bactérias convertem a matéria orgânica numa mistura de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e pequenas quantidades de hidrogênio (H_2), gás nitrogênio (N_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S). Esta mistura é conhecida como biogás e pode ser utilizada como combustível devido às elevadas concentrações de CH_4 , usualmente na faixa de 55% a 70%. O efluente líquido final do processo integra a parcela da matéria orgânica não convertida em forma solúvel e estável. A digestão pode ser realizada em diferentes tipos de reatores, também chamados digestores ou biodigestores.” (PINTO, 1999).

Este processo é complexo e normalmente é dividido em etapas para seu estudo, como exibido no esquema da Figura 7.

Fair e Moore (1934) demonstraram que as maiores taxas de reação de digestão de lodo ocorrem em duas faixas de temperatura ideais, denominadas mesófila (aproximadamente 30°C) e termófila (aproximadamente 50°C). Este comportamento é devido à existência de uma variedade de espécies microbianas presentes no meio: espera-se que cada espécie responda diferentemente às variações de temperatura, e assim, a comunidade possa atingir a máxima atividade biológica em distintas temperaturas ótimas. A falta de controle de temperatura pode afetar o equilíbrio da produção e consumo de produtos intermediários (principalmente ácidos orgânicos voláteis), o crescimento microbiano (especialmente para a arquea metanogênica), e a taxa de hidrólise de proteínas, lipídios e partículas, diminuindo a eficiência global do processo (MORAES *et al.*, 2015).

Figura 7 - Etapas da fermentação anaeróbia para produção de metano

Fonte: Adaptado de PINTO, 1999.

Uma forma de aumentar a conversão da digestão, é adicionar diferentes substratos passíveis de fermentação para serem degradados em conjunto. Tal prática propicia a promoção do equilíbrio de nutrientes, o aumento do quantitativo de material orgânico com maior potencial de biodegradabilidade, além de incorporar biomassa mais adaptada à bioestabilização dos resíduos (LEITE *et al.*, 2017).

3.1 Biogás

Biogás é a denominação para a mistura gasosa obtida por meio da digestão anaeróbia de materiais de origem orgânica, composta principalmente de CH₄ e CO₂, além de traços de outras substâncias cuja composição química típica é exibida na Tabela 1 (ZANETTE, 2009).

Tabela 1 - Composição química típica do biogás

Parâmetro	Biogás - digestão anaeróbia ¹
Poder calorífico inferior (MJ/Nm ³)	23
Metano (%vol)	53 - 70
Dióxido de carbono (%vol)	30 - 47
Nitrogênio (%vol)	-
Ácido sulfídrico (ppm)	< 1000
Amônia (ppm)	< 100

¹Produzido a partir da matéria orgânica de resíduos agropecuários em reatores anaeróbios.

Fonte: PERSSON *et al.*, 2006.

Por conta do alto teor de CH_4 em sua composição, o biogás apresenta alto grau de inflamabilidade, cujo poder calorífico resultante de sua queima pode ser aproveitado para geração de eletricidade por meio de geradores termoelétricos ou para produção de calor, que pode ser empregado no aquecimento de residências ou na cocção de alimentos em fogões à gás.

Enquanto o cenário europeu começou a visualizar este potencial de geração de energia por volta da década de 1990, o Brasil iniciou este movimento por volta de 2008 com geração elétrica em patamares tímidos, cerca de 312 GWh inteiramente destinados para o consumo doméstico. Em 2020, a geração de energia elétrica proveniente da queima de biogás no país foi de 1956 GWh, registrando um crescimento de 527% quando comparado com o início do uso desta fonte, o que indica relevante potencial de expansão do uso do biogás na matriz energética brasileira (IEA, 2021).

Especificamente no processo de digestão anaeróbia, o biogás é gerado na fase metanogênica (fase gasosa) onde as arqueas metanogênicas consomem acetato, H_2 e CO_2 como fonte de energia para seu metabolismo resultando na produção de CO_2 e CH_4 , principais componentes do biogás.

4. Substratos e inóculos para co-digestão

A digestão anaeróbia pode ser otimizada com a adição de co-substratos que interagem sinergicamente entre si, melhorando as condições de fermentação, frente ao processo com apenas um substrato (mono digestão). Como exemplo, pode-se citar o lodo de esgoto, caracterizado por baixas cargas orgânicas, além do esterco animal, que possui baixas cargas orgânicas e altas concentrações de Nitrogênio (N) (que pode inibir organismos metanogênicos). Resíduos orgânicos sólidos tem materiais impróprios e uma concentração relativamente alta de metais pesados. Resíduos agroindustriais são substratos sazonais, que podem carecer de N e resíduos de matadouro incluem riscos associados como a alta concentração de N e/ou ácidos graxos de cadeia longa, ambos inibidores potenciais da atividade metanogênica (MATA-ALVAREZ *et al.*, 2014).

Com o objetivo de aumentar a conversão da fermentação anaeróbia, é possível incluir co-substratos na mistura a ser decomposta. No caso do glicerol, como outras matérias orgânicas, é possível melhorar as condições de decomposição adicionando

substratos como resíduos agroindustriais e alimentares, justificados pelo fato que consistem basicamente em matéria orgânica (SILVA, *et al.*, 2018).

Para este trabalho serão considerados três co-substratos para digestão do glicerol. Um dos resíduos utilizados é a vinhaça citrícola (VN), resíduo agroindustrial com origem da destilação fracionada do caldo de cana fermentado para obtenção de etanol ou com origem de processos da indústria da laranja. Outro substrato é o resíduo alimentar (RA), material orgânico residual proveniente da alimentação humana, e o terceiro é o esgoto sanitário, despejo líquido de esgotos doméstico e industrial.

4.1 Resíduo alimentar

A fração de resíduos orgânicos corresponde à 45,3% da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos gerados no país em 2019. A geração desta quantidade de resíduo orgânico (aproximadamente 36 milhões de t/ano - 2019) é diretamente ligada às emissões de gases do efeito estufa que podem ser reduzidas em uma proporção de 2,3 kg CH₄/t a partir da digestão anaeróbia (ABRELPE, 2020).

Os resíduos orgânicos subdividem-se em “resíduos não alimentares”, compostos por folhas e galhos de árvores, restos de poda de jardim etc. que representam uma fração de 35% dos resíduos orgânicos totais e em “resíduos alimentares”, resíduos orgânicos originados do preparo da alimentação humana, seja ele na cozinha da residência ou em qualquer outro tipo de estabelecimento, atingindo proporções de até 65% dos orgânicos totais (VIANA *et al.*, 2006).

O valor de carbono de tais volumes de matéria orgânica é comparável ao de todos os produtos químicos e plásticos que usamos todos os anos na sociedade, mas com a vantagem óbvia que ela é renovável. Sua exploração, no entanto, não é trivial. A maior parte do lixo doméstico constitui um desafio logístico e é subutilizado como um recurso apesar de seu potencial como fonte de compostos químicos valiosos. A valorização de resíduos é uma abordagem atraente de popularidade crescente que pode oferecer uma gama de alternativas potencialmente úteis para lidar com resíduos além do descarte e/ou disposição em aterro sanitário (LUQUE *et al.*, 2013).

O uso de RA como co-substrato na digestão anaeróbia do GB é um processo que traz como vantagens o alto teor de carbono em sua composição, o que aumenta significativamente o rendimento do biogás produzido, além disto o resíduo coopera com a flora bacteriana do ambiente, o que traz melhoras cinéticas significativas nas reações de decomposição (BAERE, 2006).

4.2 Vinhaça citrícola

A vinhaça é constituída de um líquido residual do processo de destilação de substratos orgânicos para a obtenção de etanol (e.g caldo de cana de açúcar, beterraba, etc). Apresenta alto poder de poluição e alto valor de fertilização; devido à sua rica matéria orgânica, baixo valor de pH, alta corrosividade e alto nível de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sua capacidade de poluição é cerca de cem vezes maior que a de esgoto doméstico (FREIRE *et al.*, 2000).

A VN é um dos resíduos agroindustriais mais problemáticos devido ao baixo valor de pH (3,5 – 5,0) e sua alta demanda de química de oxigênio (DQO: 50 –150 g.L⁻¹) (CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013).

A grande vantagem da utilização de VN como co-substrato para a digestão de glicerol é o alto teor de matéria orgânica que o resíduo apresenta, basicamente sob a forma de ácidos orgânicos e, em menor quantidade, por cátions como o potássio, cálcio e magnésio (ROSSETTO, 1987).

É interessante utilizar o GB e a VN como substratos para o processo de co-digestão anaeróbia por conta das propriedades físico-químicas do glicerol serem favoráveis para seu armazenamento (incolor, inodoro, viscoso, não tóxico e não explosivo) (VIANA *et al.*, 2012).

4.3 Esgoto sanitário

Segundo a norma ABNT/NBR 9648 (1986), o termo esgoto sanitário pode ser definido como: “Despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária.” e as suas subdivisões são explicitadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Definições dos tipos de esgoto sanitário

Termo	Definição
Esgoto doméstico	"Despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas."
Esgoto industrial	"Despejo líquido resultante dos processos industriais, respeitados os padrões de lançamento estabelecidos."
Água de infiltração	"Toda água, proveniente do subsolo, indesejável ao sistema separador e que penetra nas canalizações."
Contribuição singular	"Vazão de esgoto concentrada em um ponto da rede coletora, significativamente maior que o produto da taxa de contribuição por superfície esgotada, pela área responsável por esse lançamento."

Contribuição pluvial parasitária	"Parcela de deflúvio superficial inevitavelmente absorvida pela rede coletora de esgoto sanitário."
----------------------------------	---

Fonte: Adaptado de NBR 9648-1986, ABNT, 1986.

As definições descritas pela norma são suficientes para deixar claro as origens do esgoto sanitário, porém tão importantes quanto às origens são os destinos que estes resíduos líquidos tomam, assim como quais são suas características físicas, químicas e biológicas além de quais impactos ambientais seu descarte incorreto pode causar no cenário nacional.

A geração de esgoto sanitário está diretamente ligada à população de um país, em 2017 a Agência Nacional de Águas (ANA) realizou um estudo para quantificar o esgoto gerado no Brasil a fim de gerar um panorama geral do segmento no país. Para estimar a carga de esgotos, considerou-se como base a DBO, parâmetro que caracteriza a parcela orgânica dos efluentes provenientes de esgotamento sanitário. No estudo considerou-se o valor “per capita” de 54 g DBO/hab.dia e dados de população urbana obtidos a partir de projeções do IBGE, obtendo um resultado de geração nacional de 9,1 mil toneladas de DBO/dia (ANA, 2017). Como as projeções para estes valores de geração de esgoto apresentam um aumento proporcional ao aumento da população, é preciso estudar alternativas tecnológicas para seu tratamento que podem variar de acordo com a tecnologia disponível na região, características do corpo receptor e legislação vigente.

A composição química do esgoto doméstico divide-se basicamente em matéria orgânica e inorgânica, com proporção de 70% e 30% em sua composição, respectivamente. Em relação à fração de matéria inorgânica, seus principais constituintes são substâncias minerais dissolvidas e areia, enquanto que sua parte de matéria orgânica é constituída por: compostos de proteínas (40% a 60%), carboidratos (25% a 50%), gorduras e óleos (10%) e outras substâncias em menor escala como ureias, sulfatans, fenóis, etc. Sobre as características biológicas do esgoto doméstico, observa-se a presença de microrganismos como bactérias, fungos, protozoários, vírus e algas, com destaque para bactérias pela sua ação na decomposição e estabilização da matéria orgânica (FUNASA, 2019). Esta combinação de alto teor de matéria orgânica e intensa presença bacteriana proporciona um cenário ideal para o processo de digestão anaeróbia, fornecendo substrato para as reações e microrganismos que serão essenciais em todas as fases do processo.

O processo de tratamento do esgoto se objetiva basicamente na redução da matéria orgânica, dos microrganismos patogênicos, dos sólidos em suspensão e, em alguns casos, dos nutrientes presentes nos esgotos sanitários. No Brasil, existem cerca de 2768 estações de tratamento de esgoto (ETE) em operação, sendo deste total 328 unidades que contam com o processo de digestão anaeróbia, responsáveis pela remoção de DBO equivalente à 3,9 milhões de pessoas, com eficiência média de 69% (ANA, 2017).

5. Co-digestão de glicerol com resíduo alimentar

O processo de co-digestão de GB com RA é objeto de estudo de pesquisadores de todas as regiões do mundo, e ao longo dos últimos anos é possível perceber sinergia entre os trabalhos, com métodos cada vez mais padronizados e resultados comparáveis. Após pesquisa realizada na plataforma de busca científica “Google Scholar”, utilizando os termos: “Crude glycerol anaerobic co-digestion with food waste”, foram localizados 3730 resultados dentro do período de publicação entre 2017 e 2022. Dentro destes resultados, 4 artigos foram selecionados por conta da semelhança entre substratos, inóculos, tipo de reator, e condições operacionais. A comparação busca elucidar os efeitos das variáveis operacionais na geração de biogás, CH_4 e H_2 , além da redução de Demanda Química de Oxigênio (DQO), sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV). Os resultados comparativos entre os trabalhos são exibidos no Quadro 2.

Em 2021, Jensani e colaboradores (2021) conduziram um estudo para investigar a produção de biogás por meio de co-digestão anaeróbia utilizando como substratos GB preparado em laboratório e RA sintético (55% arroz, 24% batata e 21% melancia, por peso). Como inóculo, foi utilizado lodo anaeróbio coletado de ETE de uma planta de produção de óleo de palma. O processo foi conduzido à temperaturas mesófila (35°C) e termófila (55°C) com volume de trabalho de 180 mL por 14 dias em digestores anaeróbios. A razão (v/v) entre inóculo e substrato foi 1:2 e 1:0 (controle) e variação de proporção entre RA e GB na composição do substrato que foi avaliada em cinco faixas (RA:GB) 4:0, 3:1, 1:1, 1:3. Como resultados, a maior produção cumulativa de biogás (6,8 mL/g) foi obtida no digestor anaeróbio contendo proporção de mistura de RA para GB de 3:1. Este trabalho mostra que a co-digestão de resíduos alimentares e GB foi mais eficaz do que a mono-digestão utilizando um digestor anaeróbio com proporção adequada de RA para GB e sob temperatura em torno de

35°C. Esta relação também melhorou a eficiência de remoção até 32,62% para ST e 35,81% para DQO.

Silva e colaboradores (2017) realizaram em 2017 um estudo para avaliar os efeitos da adição de GB em co-digestão com RA em termos de geração de H₂, utilizando GB obtido da síntese de biodiesel e RA obtido de um restaurante universitário (57,4% frutas e vegetais, 13,5% grãos, 26,3% carne e 2,8% materiais rejeitados, em peso) para o processo de co-digestão anaeróbia. Como inóculo, foi utilizado lodo anaeróbio coletado de uma ETE municipal. O processo foi conduzido à faixa de temperatura mesófila (35°C) com volume de trabalho de 120 mL por 36 h em digestores anaeróbios agitados. A razão entre inóculo e substrato foi 1:1 (v/v) enquanto que a concentração de GB no substrato contendo RA variou entre 0%, 1%, 3% e 5% (v/v). Como resultados, o aumento na concentração de GB de 1% para 3% (v/v) (140 mL H₂/g SV e 176 mL H₂/g SV respectivamente) resultou em uma geração consideravelmente maior de H₂, mas um aumento adicional para 5% não melhorou significativamente o rendimento de H₂. (176 mL H₂/g SV).

Alves e colaboradores (2022) conduziram um trabalho similar em 2021 onde os efeitos de GB em co-digestão com RA foram avaliados em termos de geração de biogás e CH₄. Como substratos, foram utilizados lodo primário de uma ETE estadual, GB proveniente da produção de biodiesel e RA obtido de um restaurante universitário (57,41% frutas e vegetais, 26,32% carne, 13,54% grãos e 2,73% materiais rejeitados, em peso). Como inóculo, lodo de esgoto digerido foi usado nos experimentos, obtido de um digestor anaeróbio instalado na mesma planta da qual o lodo primário foi coletado. O processo foi conduzido em temperatura mesófila (37°C) e com um volume de trabalho de 150 mL com proporção de inóculo e substrato de 2:1 por 20 dias. As condições do substrato foram avaliadas como misturas ternárias, tendo como base a mistura de RA e lodo primário como 1:1 e a adição de GB em 1% e 3% (v/v). Como resultados, a composição de substrato com adição de GB em 1% (v/v) levou à geração de 432,4 mL/g SV de biogás (41,8% superior ao substrato contendo apenas RA) e em termos de metano, a produção foi de 343,3 mL CH₄/g SV (45,4% superior ao substrato contendo apenas RA). Para os testes onde houve adição de 3% (v/v) de GB ao substrato, foi observada maior produção de biogás e metano, 692,6 mL/g SV e 679 mL CH₄/g SV, respectivamente, obtendo melhoria em relação ao processo contendo apenas RA em 127% e 122,7%.

Um estudo de 2018 conduzido por Andriamanohiarisoamanana e colaboradores (2018) abordou o mesmo conceito de co-digestão, mas com alterações quanto à composição do RA e do inóculo utilizado. Como substratos, foram utilizados GB proveniente da produção de biodiesel, esterco bovino (EB) obtido de uma fazenda de laticínios e farinha de ossos e carne (FOC) obtidos de uma fábrica de graxaria. O inóculo foi obtido de uma usina de biogás mesófila ativa, tratando o EB como único substrato. O processo foi conduzido à temperatura mesófila (38°C) com um volume de trabalho de 12 L por 30 dias em reatores semi-CSTR. A composição do substrato foi variada e a melhor proporção foi de 50% EB, 37% FOC e 13% GB (v/v). Como resultados, a geração de biogás foi de 0,59 L/g SV e de CH₄ 0,42 L/g SV.d).

Quadro 2 - Quadro comparativo de trabalhos de co-digestão entre GB e RA

Substratos	Reator	Inóculo	Melhores condições operacionais	Geração	Referência
Glicerol Bruto + Resíduo Alimentar	Digestor anaeróbio	Lodo anaeróbio	Volume de trabalho de 180 mL para 14 dias à temperatura de 35°C. Proporção de RA para GB de 3:1. Proporção entre inóculo e substrato de 2:1	Produção acumulada de biogás de 6,8 mL/g. Redução de DQO em 35,81% (118,4 mg/L). Redução de sólidos totais em 32,62% (6,10 pontos percentuais)	(JENSANI <i>et al.</i> , 2021)
Glicerol Bruto + Resíduo Alimentar	Digestor Anaeróbio	Lodo anaeróbio	Volume de trabalho de 120 mL para 36h à temperatura de 35°C. Proporção de GB para RA de 5% (v/v). Proporção entre inóculo e substrato de 1:1	Rendimento de hidrogênio (180 mL H ₂ /g SV) a 5% GB enquanto a taxa máxima de produção específica (cerca de 13 mL H ₂ /g SV)	(SILVA <i>et al.</i> , 2017)
Glicerol Bruto + Resíduo Alimentar + Lodo Primário	Digestor anaeróbio	Lodo digerido de digestor anaeróbio de ETE	Volume de trabalho de 150 mL para 20 dias à temperatura de 37°C. Proporção de substrato entre RA e Lodo primário em 1:1 e adição de glicerol em 3% (v/v). Proporção entre inóculo e substrato de 2:1.	692,6 mL/g SV (biogás) 679 mL/g SV (CH ₄)	(ALVES <i>et al.</i> , 2021)
Glicerol Bruto + Farinha de carne e ossos (Resíduo Alimentar) + esterco bovino	Semi CSTR	Lodo digerido	Volume de trabalho de 12 L para 30 dias à temperatura de 38°C. Proporção de substrato: 50% EB, 37% FOC e 13% GB. Proporção entre inóculo e substrato de 1:1.	0,59 L/g SV (biogás) 0,42 L/g SV.dia (CH ₄)	(ANDRIAMANOHIARISOAMANANA <i>et al.</i> , 2018)

Fonte: Elaborado pelo autor.

6. Co-digestão de glicerol com vinhaça citrícola

A compreensão das tecnologias de co-digestão de resíduos de biocombustíveis, tais como VN e GB, é um passo importante na busca de melhorias operacionais em sistemas anaeróbios, melhorando a recuperação de energia por meio da produção de biogás (BORGES *et al.*, 2021).

Após pesquisa realizada na plataforma de busca científica “Google Scholar”, utilizando os termos: “Crude glycerol anaerobic co-digestion with sugarcane vinasse”, foram localizados 377 resultados dentro do período de publicação entre 2018 e 2022. Dentro destes resultados, 3 artigos foram selecionados por conta da semelhança entre substratos, inóculos, tipo de reator, e condições operacionais. A comparação busca elucidar os efeitos das variáveis operacionais na geração de biogás, CH₄ e H₂, além da redução de DQO, ST e SV. Os resultados comparativos entre os trabalhos são exibidos no Quadro 3.

Quadro 3 - Quadro comparativo de trabalhos de co-digestão entre GB e VN

Substratos	Reator	Inóculo	Melhores condições operacionais	Geração	Referência
Glicerol Bruto + Vinhaça citrícola	Digestor anaeróbio	Lodo granular de um reator metanogênico UASB	Volume de trabalho de 1 L para 45 dias à temperatura de 30°C. Proporção de VN para GB de 1:1. Proporção entre inóculo e substrato de 1:1	Produção acumulada de metano de 557 mL CH ₄	(BORGES <i>et al.</i> , 2021)
Glicerol Bruto + Vinhaça citrícola	Digestor anaeróbio	Lodo granular de reator UASB termófilo (55°C) + lodo granular mesófilo de reator UASB	Primeiro estágio: Volume de trabalho de 0,4 L a 37°C durante 112h. com alimentação de 0,12 SV (g L ⁻¹). Segundo estágio: Alimentação com o efluente líquido gerado no primeiro estágio e adição do inóculo (20% (v/v)). Digestão conduzida por 624 h à 37°C.	11,79 mmol CH ₄ g ⁻¹ DQO consumido 0,2 mmol H ₂ g ⁻¹ DQO consumido	(RODRIGUES <i>et al.</i> , 2021)
Glicerol Bruto + Lodo digerido (Vinhaça + Palha + torta de filtro)	Reator anaeróbio CSTR	Lodo digerido de digestor anaeróbio de ETE	Volume de trabalho de 5 L a 37°C durante 96 dias. Alimentação de IN 2:1 SB e GS 3:1 VN	Biogás: 760 mL/g DQO CH ₄ : 295 mL/g DQO	(ADIYIA, 2021)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Borges e colaboradores (2021) conduziram em 2021 um estudo para investigar a produção de CH_4 a partir da co-digestão em temperatura mesófila (30°C) da VN e do GB de uma perspectiva cinética. Foram realizados ensaios em lotes para avaliar os impactos de diferentes proporções de ambos os co-substratos na produção de CH_4 . As amostras de VN foram recolhidas de uma biorrefinaria de cana de açúcar em escala real situada em Pradópolis, São Paulo, Brasil. A amostragem foi realizada durante todo o período de colheita da cana de açúcar de 2019 a 2020. As amostras de GB foram recolhidas da indústria Biobrotas Oleoquímica, localizada em Brotas, São Paulo, Brasil, uma empresa que produz fração duplamente destilada de glicerol purificado (GP) com 99,5% de pureza. Como inóculo, foi utilizado lodo granular de um reator metanogênico UASB em escala real instalado em uma indústria de abate de aves (Ideal Ltda), localizada em Pereiras, São Paulo, Brasil, sob condições mesófilas. O processo foi conduzido a temperatura mesófila (30°C) em volume de trabalho de 1 L por 45 dias em reatores anaeróbios com proporção entre inóculo e substrato de 1:1 (v/v). A composição de substratos foi variada e o reator alimentado apenas com VN (mono digestão) gerou 495 mL CH_4 enquanto os melhores cenários foram as digestões com frações de 100% GB e 1:1 entre VN e GB, atingindo gerações acumuladas de 570 e 557 mL CH_4 respectivamente. Observa-se portanto aumento de 12,53% de geração no reator onde foi realizada a co-digestão.

Rodrigues e colaboradores (2021) conduziram um trabalho para avaliação da eficiência bioconversão da co-digestão anaeróbia do GB com VN. O GB utilizado como substrato foi obtido da planta piloto de produção de biodiesel do Instituto de Biotecnologia (Ibiotec) da Uniara, Araraquara–SP. O biodiesel foi produzido por processo de transesterificação a partir de óleos residuais domésticos, metanol e hidróxido de sódio (catalisador). A VN foi retirada da obtenção do etanol de segunda geração da fermentação de carboidratos da biomassa da indústria citrícola (Matão-SP). Em relação aos inóculos, foram utilizados dois diferentes consórcios para os dois estágios do estudo, o primeiro com foco na fermentação (produção de H_2) e o segundo com foco na metanogênese (produção de CH_4). O inóculo produtor de H_2 foi proveniente do reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor) termófilo (55°C) usado no tratamento da VN sucroalcooleira (Pradópolis – Brasil). Já o inóculo produtor de CH_4 foi obtido do lodo granular mesófilo de reator UASB usado no tratamento de resíduos de avicultura (Avícola Dacar – Tietê – SP). As digestões foram conduzidas em reatores anaeróbios em batelada em dois estágios. O primeiro estágio

foi conduzido em volume de trabalho de 0,4 L a 37°C durante 112 h com alimentação de 0,12 SV (g.L^{-1}) de inóculo e variações na proporção entre substratos. O segundo estágio foi alimentado com o efluente líquido gerado no primeiro estágio além da adição do inóculo (20% (v/v)) e a digestão foi conduzida por 624 h à 37°C). Como resultados, pode-se observar a geração de 0,2 $\text{mmol H}_2.\text{g}^{-1}$ DQO consumido no primeiro estágio em configuração de 1:1 (v/v) de GB e VN, enquanto no controle (mono-digestão de GB) não foi detectada geração de H_2 . No segundo estágio observou-se 11,79 $\text{mmol CH}_4.\text{g}^{-1}$ DQO (GB:VN: 1:1 (v/v)) enquanto o controle (mono-digestão de GB) gerou 2,09, comprovando aumento de geração de CH_4 em 464,11%.

Adiyia (2021) realizou testes para medir a produção de CH_4 a partir da co-digestão de lodos de digestores, GB e efluentes de um reator anaeróbio de tanque agitado (CSTR) digerido (VN, palha e torta de filtro). A VN, palha e torta de filtro foram obtidos de uma indústria canavieira e destilaria de etanol do Brasil. E como co-substrato, foi utilizado GP sintético (98% puro, $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$). O inóculo foi retirado de um digestor anaeróbio que tratava efluentes dos estágios de tratamento primário e secundário de uma ETE. Operacionalmente, o processo foi conduzido em volume de trabalho de 5 L em temperatura mesófila (37°C) por 96 dias. Os reatores foram alimentados em proporção de inóculo para substrato de 2:1 e a proporção entre GP e o substrato digerido foi avaliada sob diversas condições e a configuração que apresentou o maior rendimento em geração de CH_4 foi a adição de glicerol de 15% e 25%, aumentando a produção de biogás e CH_4 de 340 para 760 ml/g DQO e para 130 e 295 ml/g DQO , correspondendo a um aumento percentual de 300% e 170%, respectivamente, enquanto que a superação de 50% de glicerol resultou na diminuição da produção de CH_4 .

7. Alternativas de reatores para co-digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia de resíduos líquidos pode ser realizado em diversos tipos de reatores. Este trabalho busca comparar e referenciar estudos que conduziram as reações de fermentação em processos em reatores em batelada (Batch Reactor), CSTR (Continuously Stirred Tank Reactor) e UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket).

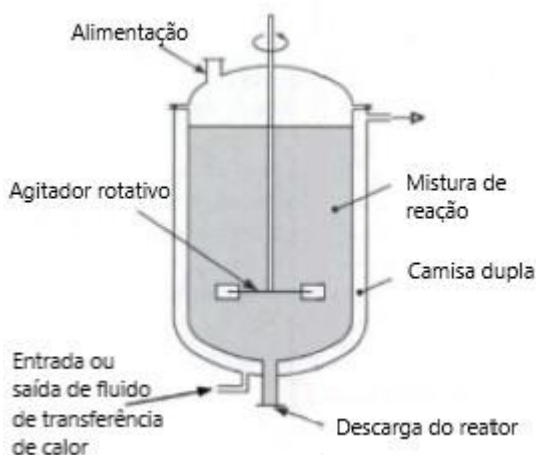
Vários estudos bem sucedidos, em experimentos com reatores em batelada e CSTR, foram publicados com referência aos benefícios da adição de glicerol para melhorar a digestão anaeróbia de agro resíduos em geral, EB, resíduos de frutas,

fração orgânica de resíduos sólidos, esterco de suínos, lodo de esgoto e mistura de esterco e resíduos industriais orgânicos (NARTKER *et al.*, 2014).

7.1 Reator em batelada

Os reatores operados em batelada processam um lote de material de cada vez em um sistema fechado. Uma vantagem do reator em batelada é o investimento de capital relativamente pequeno em comparação com alternativas mais complexas. Os parâmetros operacionais importantes no caso de reatores gravimétricos são uma boa mistura e transferência de calor. Uma boa mistura é particularmente importante para prover uma dispersão homogênea de todas as espécies e para garantir uma boa transferência de massa e calor entre as fases (WINTERBOTTOM; KING, 2019).

Figura 8 - Reator batelada com jaqueta dupla



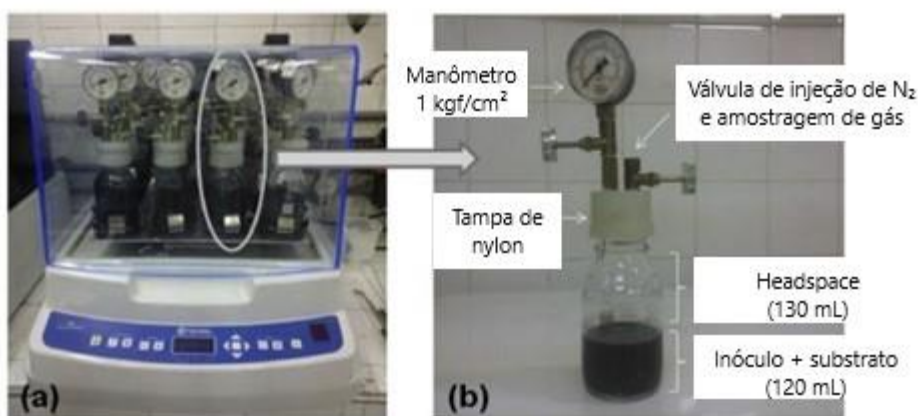
Fonte: Adaptado de: WINTERBOTTOM e KING, 2019.

Este tipo de modelagem de reator é utilizada no contexto de co-digestão anaeróbia devido seu baixo custo/complexidade de construção, além da aplicabilidade a nível industrial.

Em um experimento conduzido por Silva e colaboradores (2017) foi utilizado um conjunto de reatores em batelada que consistem em frascos de vidro de 250 mL, hermeticamente fechados com tampas de nylon, que foram acopladas a manômetros de 1 kgf/cm² para monitorar as mudanças de pressão devidas à produção de biogás e válvulas que permitiram a injeção de N₂ e a amostragem do gás produzido durante a fermentação. O volume de trabalho utilizado nas garrafas foi de 120 mL e o restante (130 mL) consistia de volume de headspace. A temperatura de trabalho foi mantida em 35°C. Após a alimentação ter sido realizada conforme descrito no capítulo 4 deste trabalho, uma solução de HCl 1 M foi utilizada para o ajuste do pH ao valor desejado

(ou seja, 5,5), no qual a atividade metanogênica das arqueas é inibida. Todos os frascos foram purgados com gás N_2 durante 2 min para deslocar o ar e foram posteriormente colocados em um agitador orbital a 150 rpm durante 36 h. Os resultados indicaram que aumento na concentração de GB resulta em aumento na produção de H_2 . A Figura 9 exibe o conjunto de reatores em batelada utilizados neste estudo.

Figura 9 - Montagem experimental no ensaio do Potencial bioquímico de hidrogênio (PBH). (a) Teste de incubação em agitador orbital; (b) Detalhes de um frasco de vidro (reator batelada) com seus componentes

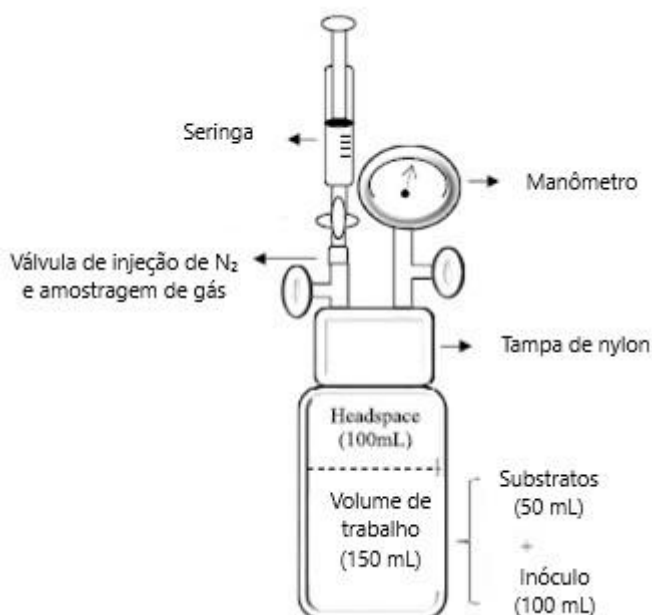


Fonte: Adaptado de: SILVA *et al.*, 2017.

No estudo conduzido por Alves e colaboradores (2022) para avaliar a co-digestão de GB com lodo de esgoto e resíduos alimentares, foram realizados ensaios em reatores batelada em cenários de mono-digestão, mistura binária e mistura ternária, conforme descrito no capítulo 4. Os testes de BMP foram conduzidos em frascos de vidro (reator batelada) com um volume total de 250 mL (150 mL volume de trabalho/ 100 mL headspace). Após alimentação de inóculo e substratos, os frascos foram fechados com tampas de nylon acopladas a medidores de pressão de 1 kgf/cm² e válvulas para injeção de N_2 e remoção de biogás. No início dos experimentos, foram submetidos a um fluxo de N_2 (99,9% de pureza) durante 2 min, depois incubados a 37°C e 150 rpm.

Após as reações terem sido conduzidas por 20 dias a geração de CH_4 foi acompanhada por meio da medição de pressão dos reatores e no fim foram coletadas amostras para análise de composição por meio de cromatografia gasosa. Os ensaios com co-digestão apresentaram maior produção de biogás. Uma ilustração do reator em batelada é exibida na Figura 10.

Figura 10 - Aparato experimental para testes do potencial bioquímico de metano (PBM) com um sistema de coleta de biogás

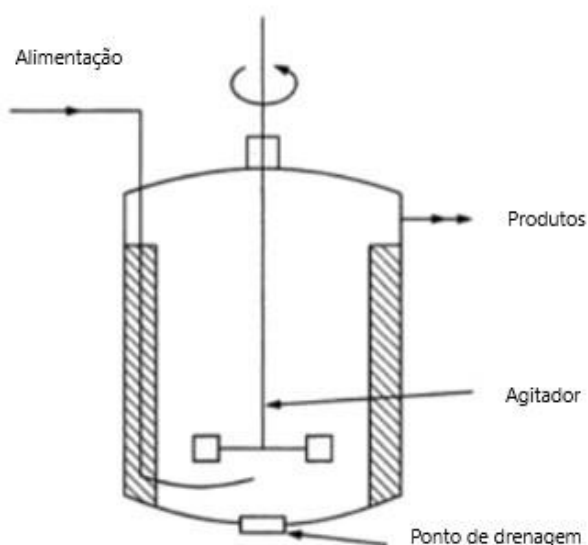


Fonte: Adaptado de: ALVES *et al.*, 2022.

7.2 Reator CSTR

O reator CSTR ou reator tanque agitado contínuo (do inglês: Continuous Stirred Tank Reactor) é um tipo de reator ideal utilizado em processos químicos para prever e calcular variáveis da operação unitária (LEVENSPIEL, 1999). Em termos de balanço de massa, considera-se um volume de controle aberto, com vazões volumétricas de entrada e saída iguais, a fim de manter o volume de trabalho constante, sob agitação contínua.

Figura 11 - Uma unidade CSTR básica com agitação mecânica



Fonte: Adaptado de: WINTERBOTTOM e KING, 2019.

Para a modelagem deste tipo de reator, as seguintes considerações são feitas:

- Densidade constante;
- Temperatura constante;
- Estado estacionário;
- Reação única e irreversível;
- Reação de primeira ordem.

Utilizando as considerações, é possível determinar a equação de concentração para o CSTR (equação 1).

$$C_A = \frac{C_{A0}}{1 + k\tau} \quad (1)$$

Onde C_A é a concentração do produto, C_{A0} a concentração inicial, k a constante cinética da reação e τ o tempo de residência no reator (SCHMIDT, 1998).

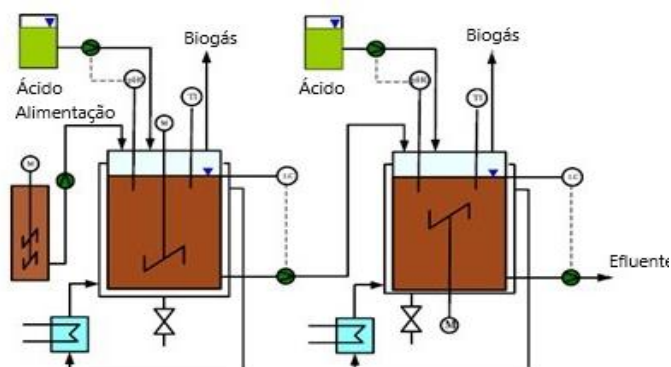
Este tipo de modelagem de reatores é empregada no contexto de co-digestão anaeróbia em escala laboratorial, visto sua aplicabilidade em escala industrial. Por meio destes estudos, pode-se investigar o efeito do glicerol no desempenho de reatores CSTR no tratamento de diferentes tipos de lodos (inóculos), preferencialmente em condições mesófilas. Resumidamente, a aplicação do CSTR nestes estudos tem como objetivos a avaliação do uso do glicerol como co-substrato para melhorar a produção de biogás, além da determinação do tempo ótimo de detenção hidráulica (TDH) e as proporções mais adequadas das diferentes misturas de matérias-primas que proporcionam uma taxa otimizada de biodegradação ou produção de metano (ANDRIAMANOHIARISOAMANANA *et al.*, 2018), (NARTKER *et al.*, 2014) e (ATHANASOULIA *et al.*, 2014). Sua operação pode ser exemplificada pelos experimentos descritos neste capítulo.

Nartker e colaboradores (2014) conduziram um estudo sobre os efeitos da adição de GB como co-substrato para a digestão anaeróbia de lodo sanitário primário em termos de geração de biogás. O processo foi dividido em duas etapas, sendo a primeira conduzida em reator operado em batelada por 30 dias sob temperatura mesófila (37°C) e a segunda em dois reatores CSTR sob estudo comparativo. Um CSTR de controle foi executado usando o lodo primário como única alimentação e foi comparado com um CSTR de co-digestão que foi executado usando quantidades primárias e crescentes de GB. Os reatores foram operados em um tempo de detenção hidráulica (TDH) de 32 dias. Os reatores foram mantidos sob alimentação de 125 mL de novo substrato diariamente e remoção de matéria digerida para manter o volume

operacional em 4 L. O CSTR “teste” começou com 1 g de GB (com 124 g de lodo primário) e foi aumentado para 10 g, com um grama adicional sendo adicionado a cada 3 - 4 semanas. O aumento gradual da adição de GB foi feito para permitir tempo suficiente para amortecer mudanças no lodo primário, e para adaptação dos microrganismos à nova alimentação. Os digestores funcionaram até que a carga de GB se tornou muito grande e o reator não podia mais sustentar a produção de gás. Os reatores foram mantidos a 37°C durante todo o experimento e foram operados por aproximadamente 9 meses. Como principal resultado, observou-se no estudo de co-digestão do lodo primário com o GB, um aumento de geração de biogás em 82% comparado ao processo de mono-digestão (apenas com lodo primário).

Athanasoulia e colaboradores (2014) estudaram a co-digestão de lodo de esgoto e GB oriundo da produção de biodiesel. O processo foi investigado usando uma série de dois reatores CSTR operando em uma faixa de tempos de detenção hidráulica (12,3 dias - 19,7 dias) a taxas de carregamento orgânico entre 1,0 e 1,7 kg DQO/m³.dia (Figura 12). A mistura de alimentação foi bombeada continuamente para o primeiro digestor, cujo efluente transbordou para a unidade do segundo digestor. A produção de biogás em cada reator foi continuamente monitorada por um medidor volumétrico de gás. A temperatura foi controlada a 37°C por meio da circulação de água quente dentro da camisa de água dos reatores. O valor do pH foi mantido constante a 6,8 - 7,2 por um controlador de pH. Três séries de experimentos foram realizadas com misturas de lodo de esgoto suplementadas com 0% (v/v) (controle), 2% (v/v), 3% (v/v) e 4% (v/v) de GB, a fim de investigar a concentração limite de GB que afeta a digestão anaeróbia. Como principal resultado, em comparação com a mono-digestão de lodo secundário, a geração diária de biogás aumentou 3,9 vezes com TDH de 16,4 dias com adição de GB de 2% (v/v).

Figura 12 - Diagrama esquemático de dois reatores anaeróbios CSTR em série. (LC: Controle de nível; M: Motor; TI: Indicador de temperatura; pHC: Controle de pH)

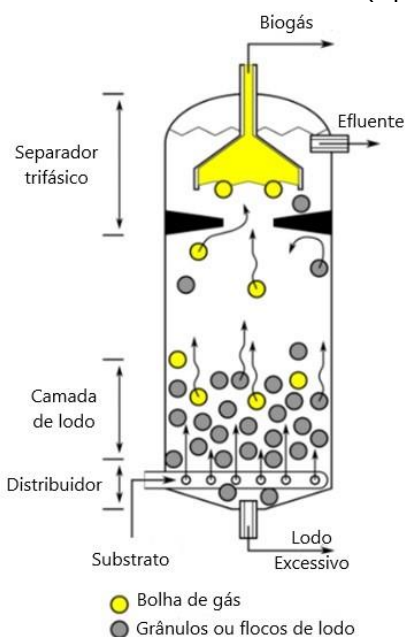


Fonte: Adaptado de: ATHANASOULIA *et al.*, 2014.

7.3 Reator UASB

O reator UASB ou reator anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo (do inglês: (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)) é um digestor anaeróbico para tratamento de águas residuais, e seu conceito operacional pode ser descrito como um bombeamento vertical de fluxo ascendente de substrato líquido, incluindo águas residuais ou meios de crescimento, por meio de uma camada de lodo anaeróbico. Os consórcios microbianos dentro da camada de lodo consomem componentes passíveis de digestão como substrato e os decompõem em compostos químicos menores. No âmbito de um tratamento de águas residuais, o objetivo da digestão anaeróbia é uma mineralização completa dos compostos orgânicos combinados com a produção de biogás para fins de recuperação de energia (PERERVA *et al.*, 2020).

Figura 13 - Conceito operacional do reator tradicional UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

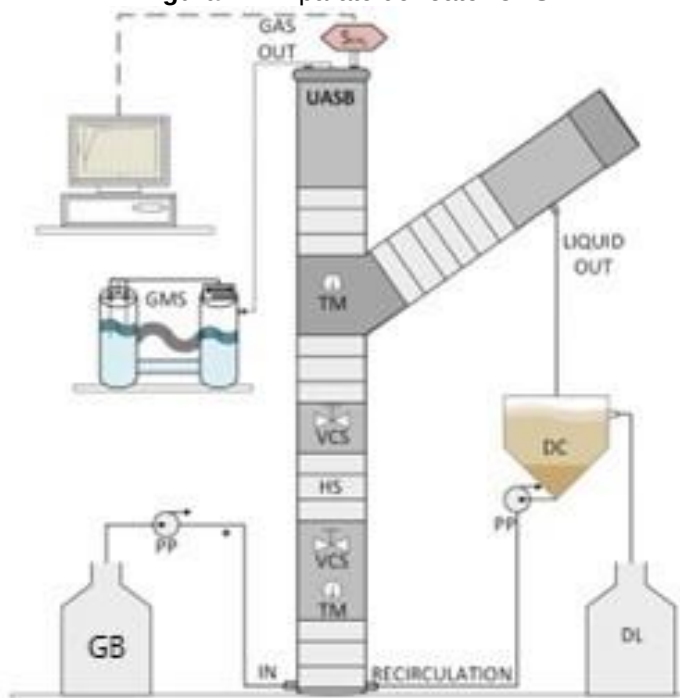


Fonte: Adaptado de: PERERVA *et al.*, 2020.

Paulista e colaboradores (2020) conduziram um estudo com objetivo de aumentar o rendimento de CH_4 da digestão anaeróbia de GB e lodo sanitário por meio da utilização de radiação ultrassom. Para a reação, foi utilizado um reator UASB com uma taxa de alimentação de $1,44 \text{ L.dia}^{-1}$ e um tempo de detenção hidráulica (TDH) de 11,5 dias. Inicialmente, o lodo sanitário foi adicionado ao reator UASB seguido de uma fase de adaptação de microrganismos anaeróbios adicionados posteriormente. Após o período de adaptação, o reator UASB foi alimentado com diferentes proporções entre inóculo e substrato (GB digerido em um pré-digestor aeróbio) para avaliação do rendimento dos diferentes cenários. Como principais resultados, o uso de radiação de

ondas ultrassom contribuiu com o aumento de geração de CH_4 até o limite de 0,2% (v/v) de GB. O diagrama esquemático do reator é exibido na Figura 14.

Figura 14 - Aparato do reator UASB



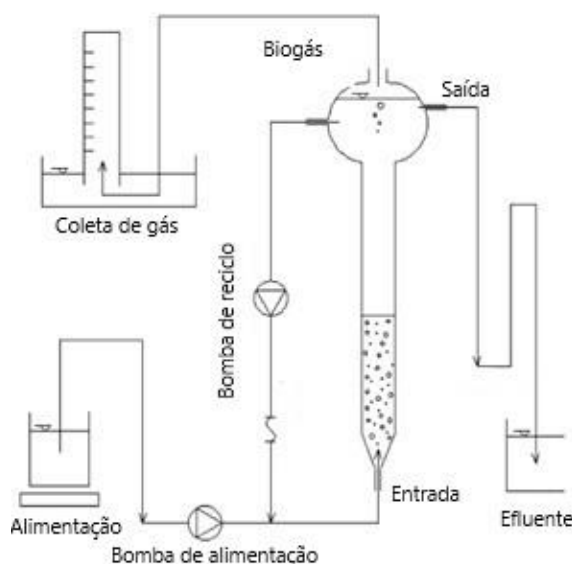
Fonte: Adaptado de: PAULISTA *et al.*, 2020.

Legenda: GB: Glicerol bruto; SCH_4 : Sensor de CH_4 ; GMS: Sistema de mensuração de gás; HS: Sistema de aquecimento; TM: Medidor de temperatura; PP: Bomba peristáltica; VCS: Válvula de coleta de amostra; DC: Decantador contínuo; DL: Líquido digerido.

Ma e colaboradores (2008) investigaram o efeito de três tipos diferentes de glicerol sobre o desempenho de reatores UASB que tratam esgoto industrial de uma unidade de processamento de batatas (Mydibel, Bélgica): GB; GP e glicerol de alta condutividade. Para isto, dois reatores UASB em escala de laboratório (controle e suplemento) com um diâmetro de 5 cm e um volume de 2,3 L foram instalados e monitorados para os três tipos de produtos de glicerol respectivamente. Ambos os reatores UASB foram inoculados com 500 ml de lodo digerido por reatores UASB da unidade industrial. Eles foram alimentados semi-continuamente, com uma vazão de aproximadamente $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, o que levou a um tempo de detenção hidráulica (TDH) de 20 h. Uma recirculação com uma velocidade de fluxo de líquido de cerca de $1 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ foi operada continuamente em ambos os reatores. Os efluentes e o biogás transbordaram para o tanque de efluentes e para a coluna de gás, respectivamente, enquanto o lodo foi retido por sedimentação nos reatores. A temperatura foi mantida

em $33 \pm 2^\circ\text{C}$ e pH, DQO, ácidos graxos voláteis e a produção de biogás foram os parâmetros monitorados. Os testes envolvendo este estudo mostraram um aumento na geração de biogás de 1,5 vezes quando GB é utilizado na co-digestão frente ao processo convencional de mono-digestão. O aparato utilizado como reator UASB para o estudo é apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Esquema da instalação experimental em escala de laboratório do reator UASB



Fonte: Adaptado de: MA *et al.*, 2008.

8. Potencialidades em geração energética e impactos ambientais

No Brasil, em 2022, existem 51 plantas produtoras de biodiesel autorizadas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) para operação no País, correspondendo a uma capacidade total autorizada de $26.602 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ (ANP, 2022).

No estado de São Paulo, existem três plantas autorizadas, que somam capacidade de $1.127 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ (Tabela 2) (ANP, 2022).

Tabela 2 - Capacidade diária de plantas do estado de SP autorizadas pela ANP para produção de biodiesel no país, 2021

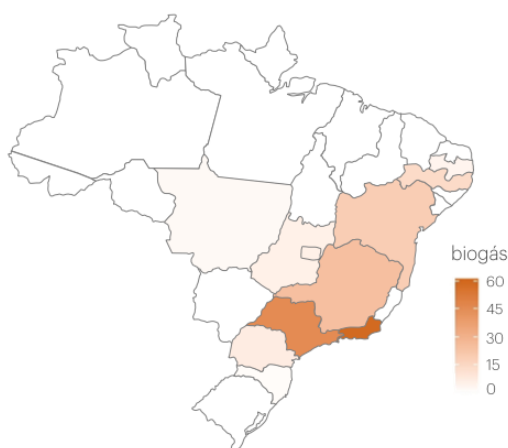
Produtor	Cidade	Capacidade de produção	
		$\text{m}^3.\text{dia}^{-1}$	t.mês^{-1}
PRISMA COMERCIAL EXPORTADORA DE OLEOQUÍMICOS LTDA	Sumaré/SP	200	715
JBS S/A	Lins/SP	560	2.003
PRODUTOS ALIMENTICIOS ORLANDIA S A COMERCIO E INDUSTRIA	Orlândia/SP	367	1.312
Total	-	1.127	4.030

Fonte: Adaptado de ANP, Dados do Sistema de Movimentação de Produtos (SIMP) da ANP e do ODK, 03/04/2022.

A razão média de geração de glicerol como subproduto em relação à produção de glicerol no país nos últimos dez anos foi de 13,36% (ANP, 2020). Baseado no valor calculado é possível determinar o volume de GB gerado na produção anual de biodiesel no estado de São Paulo em 2021. Utilizando como premissa os dados da Tabela 2 e a massa específica do glicerol como 1,26 kg/dm³ (NCBI, 2021), obtém-se o valor de geração de GB no estado de SP de 132,51 t.dia⁻¹ ou 4.030 t.mês⁻¹.

A co-digestão do glicerol residual gerado nestas plantas, apresenta certa potencialidade de geração energética por meio do biogás produzido por este processo. No cenário brasileiro, a capacidade instalada de geração a Biogás está mais concentrada nas regiões com maior potencial de produção de matéria orgânica, resíduos agrícolas, urbanos industriais e florestais, com destaque para as regiões sudeste e nordeste, conforme Figura 16 (EPE, 2021).

Figura 16 - Geração de energia (MW) a partir do biogás por UF em 2020



Fonte: EPE, 2021

Para estimar o potencial energético do emprego do GB em processos industriais de co-digestão anaeróbia, foi considerado o rendimento específico de 210,7 mL CH₄/g GB, obtido por BRAGA (2021) na co-digestão anaeróbia entre RA obtido de restaurantes da cidade de Araraquara/SP e GB (3% v/v) em reator operado em batelada inoculado com lodo granular de reator previamente usado na co-digestão da VN e GB. Sob estas condições, foi alcançada a maior produção volumétrica de metano por GB alimentado ao reator.

A projeção deste rendimento sobre a quantidade de GB produzida mensalmente em SP para o ano de 2021, representa uma potencial geração de 849.138 m³ CH₄.mês⁻¹, convertida em eletricidade (0,26 m³ CH₄/kWh) (EPE, 2021)

resultaria em $3.266 \text{ MWh.mês}^{-1}$, cerca de 0,09% da demanda residencial de eletricidade do estado, que é de $3.523 \text{ GWh.mês}^{-1}$ (EPE, 2021). Caso o CH_4 gerado fosse utilizado como gás de cocção/ aquecimento de uso residencial, representaria 386% do consumo mensal de GLP no estado, cerca de $219.750 \text{ m}^3.\text{mês}^{-1}$ (EPE, 2021). Como o custo da eletricidade do biogás se apresenta competitivo em comparação a métodos tradicionais, segundo a EPE (2021), o aumento da produtividade atrelada à co-digestão pode tornar esta alternativa ainda mais competitiva. É importante notar que tais estimativas foram feitas com base em resultados experimentais obtidos em escala de laboratório e podem ser melhor explorados em análises em maior escala, de qualquer forma, o tema mostra-se promissor.

O GB como subproduto da produção de biodiesel tende a ter sua geração proporcional ao aumento do uso de biodiesel na matriz energética brasileira. Como explicitado no capítulo 1.1, a demanda pelo produto não acompanha sua geração e isto pode trazer riscos ambientais à tona como descarte incorreto em vias fluviais (NOVI *et al.*, 2018). Algumas iniciativas de reutilização do material já estão sendo implementadas pelas próprias usinas de biodiesel, como produção de sabonetes em conjunto com a comunidade local, buscando impacto social, econômico e ambiental (NOVI *et al.*, 2018). A utilização do GB como substrato para geração de energia de biogás pode ser enquadrada como uma ação de impacto referente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Figura 17) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) e que devem ser atingidos até 2030 como “(...) ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade.” (ONU, 2022).

Figura 17 - Objetivos de desenvolvimento sustentável ONU (Agenda 2030)



Fonte: ONU, 2022.

Os objetivos e metas relacionados a este trabalho são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - ODSs e metas que podem ser contempladas pelo uso de GB em geração de energia


Objetivo 6. Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos
Meta 6.3 Até 2030, melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas e aumentando substancialmente a reciclagem e reutilização segura globalmente



Objetivo 7. Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos

Meta 7.2 Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global



Objetivo 12. Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis

Meta 12.5 Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso

Fonte: ONU, 2022.

9. Conclusão

Conclui-se que a adição de glicerol bruto como co-substrato em processos de co-digestão anaeróbia apresenta potencialidade energética positiva e pode contribuir para a redução de impactos ambientais. O incremento de produção energética está ligado à maior geração de biogás (metano e hidrogênio), relacionada ao aumento de concentração de matéria orgânica proporcionado pela adição de glicerol no processo de co-digestão. A concentração de glicerol, embora contribua positivamente no processo, é limitante para o mesmo, pois em excesso pode inibir a atividade fermentativa das arqueas metanogênicas, reduzindo a geração de biogás.

O levantamento bibliográfico do trabalho mostrou que diferentes razões entre substrato e inóculo podem ser empregadas de acordo com a natureza destes materiais e as condições operacionais. Neste sentido, é possível observar diferentes alternativas de configuração operacional de reatores, mas no geral, as temperaturas preferidas para condução deste processo se alternam entre condições mesófila (aproximadamente 30°C) e termófila (aproximadamente 50°C).

A potencialidade de geração energética está atrelada ao aumento do rendimento da co-digestão anaeróbia com o emprego do glicerol, em termos de geração de biogás. Esta pode ser empregada na geração elétrica por meio de termo geradores ou no uso de seu poder calorífico em processos de cocção/ aquecimento residencial, por meio da combustão destes gases, em maioria CH₄ e H₂.

Os impactos ambientais associados ao reaproveitamento do glicerol no processo de co-digestão estão ligados à absorção do volume deste material não demandado pela indústria brasileira, de forma a reduzir potenciais contaminações causadas por emissões indevidas em vias fluviais, além de oferecer-se como uma alternativa para a matriz energética brasileira de geração descentralizada, a partir de fontes renováveis.

Os três tipos de configuração de reatores possíveis para a condução do processo estudados neste trabalho revelaram-se como opções viáveis em termos de rendimento, porém dentre os três, o reator tipo batelada é preferível por conta do custo reduzido e da menor complexidade de operação quando comparado com os tipos CSTR e UASB.

Como sugestão para continuidade do trabalho, aconselha-se a condução de um estudo econômico comparativo entre o faturamento do subproduto glicerol como

matéria prima para outros processos e sua utilização em processos de geração de energia, como o presente trabalho.

10. Referências

- ABNT. **NBR 9648: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1986.
- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 18 jan. 2022.
- ADIYIA, P.K. **Anaerobic Co- digestion of Digestate with Glycerol to enhance Biogas Production**. Linköping: Dissertação de mestrado, Linköpings universitet, Sweden, 2021. Disponível em: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-172717>. Acesso em: 16 jan. 2022.
- ALVES, I.R.F.S., MAHLER C.F., OLIVEIRA L.B., REIS M.M., BASSIN J.P. **Investigating the effect of crude glycerol from biodiesel industry on the anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in ternary mixtures**. Energy, v. 241, n. 122818, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122818>. Acesso em: 19 maio 2022.
- ANDRIAMANOHIARISOAMANANA, F.J., SAIKAWA, A., KAN, T., QI, G., PAN, Z., YAMASHIRO, T., IWASAKI, M., IHARA, I., NISHIDA, T., UMETSU, K. **Semi-continuous anaerobic co-digestion of dairy manure, meat and bone meal and crude glycerol: Process performance and digestate valorization**. Renewable Energy, v. 128, Parte A, p. 1-8, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.056>. Acesso em: 04 out. 2021.
- BORGES, A.V., FUESS, L.T., ALVES, I., TAKEDA, P.Y., DAMIANOVIC, M.H.R.Z. **Co-digesting sugarcane vinasse and distilled glycerol to enhance bioenergy generation in biofuel-producing plants**. Energy Conversion and Management, v. 250, n. 114897, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114897>. Acesso em: 28 mar 2022.
- BRAGA, A.I. **Avaliação da produção de biogás em reatores anaeróbios alimentados com resíduos alimentares e glicerol bruto**. Relatório Científico Final FAPESP, Processo nº: 2020/04360-5, 2022.
- BRASIL, ANA. **Atlas Esgotos: Despoluição de bacias hidrográficas**. Brasília: Agência Nacional de Águas (ANA), Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2017. Disponível em: <http://atlasesgotos.ana.gov.br/>. Acesso em: 12 fev. 2022.
- BRASIL, ANP. **Dados do Sistema de Movimentação de Produtos (SIMP) da ANP e do ODK**. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DO PETRÓLEO, Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados/painel-dinamico-de-produtores-de-biodiesel>. Acesso em: 05 maio 2022.
- BRASIL, ANP. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2020**. Rio de Janeiro: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2019>. Acesso em: 01 maio 2022.

BRASIL, EPE. **Balanco Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2021 Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 25 set. 2021.

BRASIL, FUNASA. **Manual de saneamento**. Brasília: Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde (Funasa). 5.ed., 2019. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/biblioteca-eletronica/publicacoes/engenharia-de-saude-publica>. Acesso em: 21 abr. 2021.

BRASIL. **Lei nº 11.097/2005, de 13 de janeiro de 2005**. Institui o Código Civil. Diário Oficial da União. Brasília, 2005.

BRASIL, MDIC. **Dados do Comércio Exterior**. Rio de Janeiro: Ministério do Desenvolvimento, da Indústria e Comércio Exterior, 2020. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>. Acesso em: 11 jun. 2021.

BRASIL, MINFRA. **Corredores Logísticos Estratégicos: Petróleo e Combustíveis**. Brasília: Ministério da Infraestrutura (Minfra), 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/politica-e-planejamento/politica-e-planejamento/cle>. Acesso em: 07 nov. 2021.

BRASIL, MME/EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Brasília: Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE), 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>. Acesso em: 10 dez. 2021.

CHRISTOFOLETTI, C.A., ESCHER, J.P., CORREIA, J.E., MARINHO, J.F.U. & FONTANETTI, C.S. **Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use**. Waste Management, v. 33, p. 2752-2761, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005>. Acesso em: 21 ago. 2021.

COSTA, E. S., BARBOSA FILHO, O., GIORDANO, G. **Reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB): Uma abordagem concisa**. Rio de Janeiro: FEN / UERJ, 2014. v. 1. 121p.

DE BAERE, L. **Will anaerobic digestion of solid waste survive in the future?**. Water Science & Technology, v. 53, p. 187–194, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2006.249>. Acesso em: 02 dez. 2021.

EIA. **International Energy Data, Monthly Update**. EUA: U.S. Energy Information Administration, 2019. Disponível em: <https://www.eia.gov/international/data/world>. Acesso em: 19 maio 2021.

FAIR, G. M., & MOORE, E. W. **Time and Rate of Sludge Digestion, and Their Variation with Temperature**. Sewage Works Journal, v. 6, p. 3–13, 1934. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/25028362>. Acesso em: 03 jul. 2021.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livraria e Editora Agropecuária, 2000.

GERIS, R., SANTOS, N.A.C., AMARAL, B.A., MAIA, I.S. & DOURADO, V. **Biodiesel de soja: reação de transesterificação para aulas práticas de química orgânica**.

Brasil: Química Nova v. 30, p. 1369–1373, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000500053>. Acesso em: 11 mar. 2022.

IEA. **How biogas can support intermittent renewable electricity**. Paris: International Energy Agency, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/articles/how-biogas-can-support-intermittent-renewable-electricity>. Acesso em: 03 mar. 2022.

JENSANI M.K.N., SADIKIN A.N., NGADI N., AZMAN M.F., AB MUIS Z., ASLI U.A. **Anaerobic Co-Digestion of Food Waste with Crude Glycerol for Biogas Production**. Chemical Engineering Transactions, v. 83, p. 577-582, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3303/CET2183097>. Acesso em: 02 abr. 2022.

LEITE, V.D., BARROS, A.J.M, MENEZES, J.M.C., SOUSA, J.T. & LOPES, W.S. **Co-digestão anaeróbia de resíduos orgânicos**. São Paulo: Revista DAE. v. 65. p. 35-46, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2017.004>. Acesso em: 22 dez. 2021.

LEVENSPIEL, O. **Chemical reaction engineering**. New York: Wiley, 1999.

LUQUE, R., CLARK, J.H. **Valorisation of food residues: Waste to wealth using green chemical technologies**. Sustainable Chemical Processes v. 1, n. 10, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/2043-7129-1-10>. Acesso em: 17 jul. 2021.

MA, J., VAN WAMBEKE, M., CARBALLA, M. VERSTRAETE, W. **Improvement of the anaerobic treatment of potato processing wastewater in a UASB reactor by co-digestion with glycerol**. Biotechnology Letters, v. 30, p. 861–867, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10529-007-9617-x>. Acesso em: 15 jan. 2021.

MATA-ALVAREZ, J., DOSTA, J., ROMERO-GÜIZA, M.S., FONOLL, X., PECES, M. & ASTALS, S. **A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 36, p. 412-427, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>. Acesso em: 29 jan. 2021.

MORAES, B.S., ZAIAT, M., BONOMI, A. **Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 44, p. 888-903, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.023>. Acesso em: 26 maio 2021.

NARTKER, S., AMMERMAN, M., AURANDT, J., STOGSDIL, M. , HAYDEN, O., ANTLE, C. **Increasing biogas production from sewage sludge anaerobic co-digestion process by adding crude glycerol from biodiesel industry**. Waste Management v. 34 (12), p. 2567-2571, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.017>. Acesso em: 02 maio 2022.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. **PubChem Compound Summary for CID 753, Glycerol**. EUA: PubChem, 2021. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Glycerol>. Acesso em: 17 jan. 2022.

NOVI, J.C., OLIVEIRA, S.V.W.B., JUNIOR, A.P.S. & OLIVEIRA, M.B. **Análise da gestão do glicerol: Riscos e oportunidades sobre sua destinação frente à lacuna normativa e aspectos sustentáveis**. Porto Alegre: REAd. Rev. eletrôn. adm. (Porto Alegre), v. 24, n. 3, p. 217-243, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-2311.223.85712>. Acesso em: 06 abr. 2022.

ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Nações Unidas no Brasil, 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 18 maio. 2022.

PAGLIARO, M., CIRIMINNA, R., KIMURA, H., ROSSI & M. & DELLA PINA, C. **From Glycerol to Value-Added Products**. Angewandte Chemie International Edition v.46, p. 4434-4440, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/anie.200604694>. Acesso em: 01 maio 2021.

PAULISTA, L.O., BOAVENTURA, R.A.R., VILAR, V.J.P., PINHEIRO, A.L.N. & MARTINS, R.J.E. **Enhancing methane yield from crude glycerol anaerobic digestion by coupling with ultrasound or A. niger/E. coli biodegradation**. Environmental Science and Pollution Research, v. 27, p. 1461–1474, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06748-w>. Acesso em: 26 set. 2021.

PERERVA, Y., MILLER, C., SIMS, R. **Approaches in Design of Laboratory-Scale UASB Reactors**. Processes, v. 8, n. 734, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/pr8060734>. Acesso em: 08 jul. 2021.

PERSSON, M., JÖNSSON, O., WELLINGER, A.. **Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection**. IEA Bioenergy, Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas, 2006.

PINTO, C.P. **Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável**. Campinas: Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, 1999. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/pinto.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2022.

RODRIGUES, C.V., ADAMES, L.V., MARQUES, R.F.C., JACOBUS, A.P., PIRES, L.O & MAINTINGUER, S.I. **Biossistemas integrados na co-digestão do glicerol bruto em resíduos agroindustriais para a geração de H₂ e CH₄**. Revista Matéria, v.26, n.2, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210002.1262>. Acesso em: 06 abr. 2022.

ROSSETTO, A. J. **Utilização agronômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira**. Campinas: Fundação Cargill, v. 2, p. 435-504, 1987.

SCHMIDT, L. D. **The Engineering of Chemical Reactions**. New York: Oxford University Press, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/op9900636>. Acesso em: 08 abr. 2022.

SILVA, F.M.S., MAHLER, C.F., OLIVERIA, L.B. & BASSIN, J. P. **Hydrogen and methane production in a two-stage anaerobic digestion system by co-digestion of food waste, sewage sludge and glycerol**. Waste Management, v. 76, p. 339-349, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.039>. Acesso em: 25 fev. 2022.

SILVA, F.M.S., OLIVEIRA, L.B., MAHLER, C.F., BASSIN, J.P. **Hydrogen production through anaerobic co-digestion of food waste and crude glycerol at mesophilic conditions**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 42, p. 22720-22729, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.159>. Acesso em: 29 nov. 2021.

TAPANES, N.C.O., ARANDA, D.A.G., CARNEIRO, J.W.M & ANTUNES, O.A.C. **Transesterification of Jatropha curcas oil glycerides: Theoretical and experimental studies of biodiesel reaction**. Fuel, v. 87, f. 10–11, p. 2286-2295, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.12.006>. Acesso em: 30 jul. 2021.

VIANA, E., SCHULZ, H.E., ALBUQUERQUE, R. & NORONHA, A.B. **Resíduos alimentares do lixo domiciliar: Estudo do uso na alimentação de frangos de corte**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.10, n.1, p.203–211, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000100030>. Acesso em: 18 fev. 2022.

VIANA, M.B., FREITAS, A.V., LEITÃO, R.C., PINTO, G.A.S & SANTAELLA, S.T. **Anaerobic digestion of crude glycerol: A review**. Environmental Technology Reviews, v. 1, p. 81-92, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.692723>. Acesso em: 06 nov. 2021.

WINTERBOTTOM, J.M., KING, M. **Reactor Design for Chemical Engineers**. Boca Raton: CRC Press, 1 ed., 2019 Disponível em:. Acesso em: 05 jun. 2021.

ZANETTE, A.L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no brasil**. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/index.php/pt/publicacoes/dissertacoes/2009/994-potencial-de-aproveitamento-energetico-do-biogas-no-brasil>. Acesso em: 30 set. 2021.