



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR  
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**NICOLAS FREITAS PINHEIRO**

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA CARGA ORGÂNICA VOLUMÉTRICA NA  
DIGESTÃO DE RESÍDUO DE FRUTAS E VERDURAS EM REATOR DE  
AGITAÇÃO CONTÍNUA EM UM E DOIS ESTÁGIOS**

**FORTALEZA  
2023**

NICOLAS FREITAS PINHEIRO

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA CARGA ORGÂNICA VOLUMÉTRICA NA DIGESTÃO  
DE RESÍDUO DE FRUTAS E VERDURAS EM REATOR DE AGITAÇÃO CONTÍNUA  
EM UM E DOIS ESTÁGIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Instituto Ciências do Mar, da Universidade  
Federal do Ceará, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Bacharel em Ciências  
Ambientais

Orientador: Prof. Dr. Michael Barbosa Viana  
Coorientadora: Profa. Dra. Camila Aparecida de  
Menezes

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Federal do Ceará

Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

P721a Pinheiro, Nicolas Freitas.

Avaliação do efeito da carga orgânica volumétrica na digestão de resíduo de frutas e verduras em reator de agitação contínua em um e dois estágios / Nicolas Freitas Pinheiro. – 2023.

56 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso de Ciências Ambientais, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Michael Barbosa Viana. Coorientação: Profa. Dra. Camila Aparecida de Menezes.

1. Digestão anaeróbia. 2. Metano. 3. Sistema em dois estágios. 4. CSTR. 5. Taxa de carregamento orgânico. I. Título.

---

CDD 333.7

NICOLAS FREITAS PINHEIRO

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA CARGA ORGÂNICA VOLUMÉTRICA NA DIGESTÃO  
DE RESÍDUO DE FRUTAS E VERDURAS EM REATOR DE AGITAÇÃO CONTÍNUA  
EM UM E DOIS ESTÁGIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Instituto Ciências do Mar, da Universidade  
Federal do Ceará, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Bacharel em Ciências  
Ambientais

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Michael Viana (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Camila Menezes (Coorientadora)  
Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Estado do Ceará (IFCE)

---

Prof. Dr. Priscilla Almeida  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Tropical)

*Dedico aos meus pais por todo apoio durante os meus anos de estudos que me fizeram chegar até esse momento.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Embrapa pelo suporte ao desenvolvimento dessa pesquisa. À FUNCAP pelo apoio financeiro fornecido por meio da Bolsa de Inovação Tecnologia Industrial. Ao pesquisador Dr. Renato Carrhá pela oportunidade de aprendizado no laboratório de tecnologia da biomassa.

À Dr. Camila Menezes por todo o aprendizado e preocupação com minha formação durante toda a minha bolsa.

Ao professor Dr. Michael Viana pelo suporte durante minha formação e por ter me direcionado nessa área de pesquisa que me afeiçoei tanto. Aos familiares por todo apoio durante os anos de estudo e complicações.

Aos companheiros de Embrapa: Will, Chagas, Daniel, Priscila, Isabelle, Matheus e Maíra, agradeço por todos os momentos de descontração que facilitaram o processo, de conselhos e aprendizados nessa jornada.

E por fim, agradeço a todos que fazem parte da minha vida e estão contribuindo de alguma forma para meu crescimento pessoal e profissional.

*Meus agradecimentos.*

## RESUMO

O resíduo de frutas e verduras (RFV) apresenta uma composição rica em carboidratos e elevada concentração de sólidos totais. Essa característica favorece uma acidificação excessiva no reator afetando o processo de digestão anaeróbia e prejudicando a estabilidade e a produção de metano. Uma das alternativas utilizadas para atenuar esse problema é a adoção de um processo em dois estágios. Dessa forma, o trabalho em questão tem como objetivo avaliar a digestão anaeróbia de RFV em estágio único e em dois estágios, utilizando reator de mistura completa (CSTR) e realizar a comparação do desempenho do processo em dois estágios com o processo em estágio único. Nesse sentido, foi avaliado o desempenho do processo em estágio único utilizando um CSTR metanogênico (CSTR-U) com as taxas de carregamento orgânico (TCO) 1,0, 1,5 e 2,0  $\text{kgDQO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$  em conjunto com a redução do tempo de detenção hidráulico (TDH) de 34 para 22 e 16 dias, respectivamente. No processo em dois estágios, foram utilizados dois CSTR, um acidogênico de primeiro estágio (CSTR-1) e um metanogênico de segundo estágio (CSTR-2). O CSTR-1 foi operado em uma TCO de 15  $\text{kgDQO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ . O efluente produzido pelo CSTR-1 alimentou o CSTR-2 que foi operado em TCOs de 1,5 e 2,5  $\text{kgDQO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$  com a redução do TDH de 20 para 12 dias, respectivamente. O melhor desempenho foi observado no processo em dois estágios, no qual o CSTR-2 obteve uma eficiência de remoção de matéria orgânica de 84% e apresentou rendimento de metano (RM) de 428  $\text{mL CH}_4.\text{gSV}^{-1}$  e produção volumétrica de metano de 0,459  $\text{L CH}_4.\text{L}_{\text{reactor}}^{-1}.\text{d}^{-1}$ . Comparando o desempenho do processo em dois estágios com o processo em estágio único, o de dois estágios proporcionou uma redução de 35% do volume total do reator, na medida em que o melhor desempenho do CSTR-U foi registrado na TCO de 1,0  $\text{kgDQO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$  com TDH de 34 dias, um RM de 312  $\text{mL CH}_4.\text{gSV}^{-1}$  e PVM de 0,339  $\text{L CH}_4.\text{L}_{\text{reactor}}^{-1}.\text{d}^{-1}$ . Portanto, o processo em dois estágios apresentou melhor desempenho operacional e com maior estabilidade em relação ao processo em estágio único, havendo ainda, o ganho de 50% na TCO aplicado ao reator.

Palavras-chave: Digestão anaeróbia. Metano. Sistema em dois estágios. CSTR. Taxa de carregamento orgânico.

## ABSTRACT

Fruit and vegetable waste (FVW) has a composition rich in carbohydrates and a high concentration of total solids. These characteristic favors excessive acidification in the reactor, affecting the anaerobic digestion process and harming stability and methane production. One of the alternatives used to mitigate this problem is the adoption of a two-stage process. Therefore, the work in question aims to evaluate the anaerobic digestion of FVW in a single stage and in two stages, using a complete mixing reactor (CSTR) and to compare the performance of the two-stage process with the single-stage process. In this sense, the performance of the single-stage process was evaluated using a methanogenic CSTR (CSTR-U) with organic loading rates (OLR) 1.0, 1.5 and 2.0  $\text{kgCOD.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$  in conjunction with the reduction of hydraulic detention time (HRT) from 34 to 22 and 16 days, respectively. In the two-stage process, two CSTRs were used, a first-stage acidogenic (CSTR-1) and a second-stage methanogenic (CSTR-2). CSTR-1 was inoculated with a OLR of 15  $\text{kgCOD.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ . The effluent produced by CSTR-1 fed CSTR-2, which was operated with a OLR of 1.5 and 2.5  $\text{kgCOD.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$  with a reduction in HRT from 20 to 12 days, respectively. The best performance was observed in the two-stage process, in which CSTR-2 achieved an organic matter removal efficiency of 84% and presented a methane yield (MY) of 428  $\text{mL CH}_4.\text{gSV}^{-1}$  and volumetric methane production (VMP) of 0.459  $\text{L CH}_4.\text{L}_{\text{reactor}}^{-1}.\text{d}^{-1}$ . Comparing the performance of the two-stage process with the single-stage process, the two-stage process provided a 35% reduction in the total reactor volume, as the best performance of the CSTR-U was recorded at a OLR of 1.0  $\text{kgCOD.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$  with HRT of 34 days, an MY of 312  $\text{mL CH}_4.\text{gVS}^{-1}$  and VMP of 0.339  $\text{L CH}_4.\text{L}_{\text{reactor}}^{-1}.\text{d}^{-1}$ . Therefore, the two-stage process presented better operational performance and greater stability compared to the single-stage process, with a 50% gain in OLR applied to the reactor.

Keywords: Anaerobic digestion. Methane. Two stage system. CSTR. Organic loading rate.

## **LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

Figura 1 - Esquema dos reatores CSTR utilizados .....	32
Figura 2 - Gráfico de Eficiência de remoção de matéria orgânica .....	36
Figura 3 - Gráfico do rendimento de metano .....	38
Figura 4 - Gráfico da produção volumétrica de metano .....	38
Figura 5 - Gráfico da composição de metano no biogás .....	39
Figura 6 - Eficiência de remoção de matéria orgânica do processo em dois estágios.....	43
Figura 7 - Composição de metano do processo em dois estágios .....	44
Figura 8 - Rendimento de metano do processo em dois estágios .....	44
Figura 9 - Produção volumétrica de metano do processo em dois estágios .....	45

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Compilado de trabalhos com CSTR .....	28
Tabela 2 - Caracterização do RFV .....	33
Tabela 3 - Resultado de ST, SF e SV.....	34
Tabela 4 - Análises realizadas, frequência e metodologias .....	35
Tabela 5 - Ácidos encontrados no CSTR-1 .....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CSTR	Reator de mistura completa ( <i>Continuos Stirred Tank Reactor</i> )
AGV	Ácidos graxos voláteis
AI/AP	Relação entre a alcalinidade intermediária e a alcalinidade parcial
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
DQO	Demanda química de oxigênio
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
HAc	Ácido acético
HIsBu	Ácido isobutírico
HLa	Ácido lático
pH	potencial Hidrogeniônico
PVM	Produção volumétrica de metano
SF	Sólidos fixos
ST	Sólidos totais
SV	Sólidos voláteis
TCO	Taxa de carregamento orgânico
TDH	Tempo de detenção hidráulica
C/N	Carbono/Nitrogênio
CEASA	Central de Abastecimento
TPB	Taxa de produção de biogás
RA	Resíduo alimentar
ASBR	Reator anaeróbia em bateladas sequenciais
RM	Rendimento de metano
N <sub>2</sub>	Nitrogênio
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de hidrogênio
NH <sub>3</sub>	Amônia
NAT	Nitrogênio amoniacal total
FORSM	Fração orgânica do resíduo sólido municipal
NH <sub>4</sub>	Amônio
RPM	Rotações por minuto

UASB      Reator anaeróbio de fluxo ascendente (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>3</b>	<b>REFERIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
3.1	RESÍDUO DE FRUTAS E VERDURAS.....	18
3.2	DIGESTÃO ANAERÓBIA .....	21
3.2.1	Temperatura.....	22
3.2.2	pH .....	22
3.2.3	Características dos substratos .....	23
3.2.4	Inóculo.....	24
3.2.5	Carga orgânica .....	25
3.2.6	Relação C/N .....	25
3.2.7	Ácidos graxos voláteis.....	25
3.2.8	Tempo de Detenção Hidráulica .....	26
3.3	TIPO DE REATOR .....	27
3.3.1	Reator de baixa taxa e resíduos de frutas e verduras.....	28
3.4	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS .....	29
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>31</b>
4.1	REATOR DE AGITAÇÃO CONTÍNUA .....	31
4.1.1	Reator CSTR metanogênico.....	31
4.1.2	Reator CSTR acidogênico .....	31
4.2	RESÍDUO DE FRUTAS E VERDURAS E FONTE DO INÓCULO .....	32
4.2.1	Resultado de sólidos totais e voláteis do lodo .....	33
4.3	OPERAÇÃO DOS REATORES CSTR .....	34
4.3.1	Operação em estágio único.....	34
4.3.2	Operação em dois estágios.....	34
4.4	ANÁLISES REALIZADAS .....	35
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>36</b>
5.1	OPERAÇÃO EM ESTÁGIO ÚNICO .....	36
5.2	OPERAÇÃO EM DOIS ESTÁGIOS .....	40
5.2.1	CSTR ACIDOGENICO .....	40
5.2.2	CSTR METANOGENICO.....	42

6	CONCLUSÃO .....	46
	REFERÊNCIAS .....	47

## 1 INTRODUÇÃO

A população mundial alcançou, em novembro de 2022, a marca de aproximadamente 8 bilhões de habitantes. E segundo estimativas da Organização das Nações Unidas (ONU, 2022), esse crescimento pode chegar a 10,4 bilhões de habitantes em 2080, permanecendo neste nível até 2100. Com esse crescimento populacional, a segurança alimentar mundial se torna cada vez mais uma questão de urgência. Segundo a edição de 2023 do relatório da *Food and Agriculture Organization* (FAO, sigla em inglês), uma média de 735 milhões de pessoas passou fome em 2022. Além disso, aproximadamente 29,6% da população global, equivalente a 2,4 bilhões de pessoas, não tem acesso constante a alimentos, representando casos de insegurança alimentar moderados ou graves (FAO, 2023). Nesse contexto, a produção alimentar necessita ser cada vez maior para atender essa demanda e como consequência uma grande porcentagem de alimentos é desperdiçada durante todas as fases da cadeia alimentar. A FAO (2023) aponta que entre um quarto e um terço dos alimentos produzidos anualmente é perdido ou desperdiçado, isso corresponde a cerca de 1,300 bilhões de toneladas de alimentos incluindo 30% de cereais, entre 40 e 50% de raízes, frutas, hortaliças e sementes oleaginosas, 20% de carne e laticínios e 35% de peixes.

Nesse contexto, a digestão anaeróbia (DA) pode ser utilizada como uma das alternativas para lidar com a geração de resíduos dessa produção alimentícia. A DA consiste em um processo microbiológico que envolve a decomposição de matéria orgânica complexa por um conjunto de microrganismos na ausência de oxigênio, produzindo biogás e efluente rico em nutrientes (Magama et al., 2022). Essa técnica pode ser aplicada em diferentes temperaturas: psicrofílicas (10-20 °C), mesofílicas (25-35°C) e termofílicas (55-65 °C) (Bouallagui et al., 2004). E pode ser dividida em 4 etapas, cada uma com condições ideais específicas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Mao et al., 2015; Mir et al., 2016). Esse processo obteve mais atenção por ser uma forma efetiva de tratamento sob condições controladas que pode valorizar o RFV (Ganesh et al., 2022) através da produção energética (Masebinu et al., 2018).

No Brasil, as Centrais Estaduais de Abastecimento (CEASA) produzem cerca de 10,9 milhões de toneladas de resíduos de frutas e verduras (RFV) (Silva Júnior et al., 2022). E no Estado do Ceará, todos os resíduos gerados na CEASA de Maracanaú são destinados para aterros sanitários, resultando em um custo de US\$ 137,000.00 por ano (Silva Júnior et al., 2022). Nesse contexto, a utilização da DA para o tratamento do RFV produzido pela CEASA

de Maracanaú se mostra interessante pelo grande potencial de reaproveitamento para a produção energética. Esse potencial é decorrente do seu alto teor de matéria orgânica biodegradável e seu alto teor de umidade, que beneficiam o desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pelo processo de DA (Chatterjee et al., 2020; Agrawal et al., 2022). Contudo, devido a composição rica em carboidratos simples do RFV, o seu tratamento através da DA apresenta como principal desafio a rápida acidificação do sistema por causa da facilidade de degradação desse tipo de resíduo (Scano et al., 2014). Uma das alternativas para atenuar o problema de acidificação na digestão anaeróbia de RFV é a adoção da separação das etapas iniciais (hidrólise, acidogênese e acetogênese) da etapa final (metanogênese), aplicando um processo de digestão anaeróbia em dois estágios com reatores distintos. A partir disso, é possível realizar a aplicação de maiores taxas de carregamento orgânico (TCO) em comparação com o processo em estágio único. Isso se deve a possibilidade de fornecer as condições ideias específicas para cada etapa do processo de digestão anaeróbia, beneficiando a estabilidade do sistema e a produção de metano (Agrawal et al., 2022).

Em decorrência dos desafios encontrados no tratamento anaeróbio de RFV, grande parte dos trabalhos com esse resíduo operam em TCO baixas (2 a 3 kgDQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>), para evitar problemas de instabilidade durante o processo (Hecht e Griehl, 2009; Ganesh et al., 2022). Aliado a isso, esse tipo de resíduo apresenta, em sua composição, uma quantidade elevada de materiais sólidos, 7,4 – 17,9% de sólidos totais (ST) (Xu et al., 2018). Dentre os tipos de reatores, o reator de mistura completa (CSTR) foi amplamente usado por diversos autores para o tratamento de RFV (Lin et al., 2011; Edwiges et al., 2020; Farhat et al., 2018; Wang et al., 2018; Liu et al., 2019; Megido et al., 2021). A grande vantagem do CSTR para a aplicação da DA está na sua capacidade de suportar concentrações de ST acima de 5% e alta capacidade de mistura que proporciona homogeneização do meio e maior contato dos microrganismos com substrato favorecendo seu crescimento (Megido et al., 2021; Wang et al., 2018).

Com isso, a operação do CSTR necessita de um bom planejamento para o tempo de detenção hidráulico (TDH), pois este parâmetro está associado ao custo operacional na medida em que valores elevados de TDH precisam de reatores com volumes elevados, sendo interessante, dessa forma, a adoção de TDH menores. Nesse contexto, para a operação de reatores CSTR realizando o tratamento RFV e outros tipos de resíduos alimentares a literatura geralmente adotada TDH entre 20 e 40 dias (Edwiges et al., 2020; Ganesh et al., 2022). Além disso, a temperatura é outro parâmetro de grande importância para o processo de DA, visto que afeta diretamente a atividade metabólica dos microrganismos, as taxas de reações e o

rendimento dos produtos (Mir et al., 2016). No que diz respeito a temperatura ideal para o tratamento de RFV através do processo de DA, na literatura observa-se a grande maioria dos trabalhos utilizando lodos mesofílicos (35 a 40 °C). Na mesma medida, o controle do pH é de suma importância para o processo de DA, pois cada etapa apresenta uma faixa de pH ideal para realização das suas atividades metabólicas (Mao et al., 2015; Mir et al., 2016).

Dessa forma, o trabalho em questão tem como objetivo avaliar a produção de metano a partir da digestão anaeróbia RFV em reator CSTR mesofílico de estágio único aplicando TDH de 34, 22 e 16 dias com TCO de 1,0, 1,5 e 2,0 kgDQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>, respectivamente. E, na etapa seguinte, foi realizada a avaliação do desempenho do processo em dois estágios utilizando um CSTR acidogênico com TDH de 2 dias e TCO de 15 kgDQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup> e um CSTR metanogênico aplicando TDH de 20 e 12 dias com TCO de 1,5 e 2,5 kgDQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>, respectivamente. E a partir dos resultados observados, foi realizada a comparação do desempenho do processo em estágio único com o processo em dois estágios.

## 2 OBJETIVOS

Avaliar a digestão anaeróbia de RFV em um e dois estágios, utilizando reatores de mistura completa (CSTR) mesofílicos (30°C) e comparar o desempenho do processo em dois estágios com o processo em estágios único.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Produção de metano a partir da digestão anaeróbia de resíduo de frutas e verduras em reator CSTR mesofílico de estágio único aplicando TDH de 34, 22 e 16 dias com TCO de 1,0, 1,5 e 2,0 kgDQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>.
- Produção de metano a partir da digestão anaeróbia de resíduo de frutas e verduras do processo em dois estágios utilizando um CSTR acidogênico com tempo de detenção hidráulico de 2 dias e TCO de 15 kgDQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup> e um CSTR metanogênico aplicando TDH de 20 e 12 dias com TCO de 1,5 e 2,5 kgDQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>.
- Comparaçāo do desempenho da produção de metano do processo em dois estágios com o processo em estágio único.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 RESÍDUO DE FRUTAS E VERDURAS

Frutas e verduras são as *commodities* mais utilizadas dentre todas as culturas hortícolas. Elas são consumidas de forma bruta, minimamente processada, ou processada, devido ao seu valor nutricional e compostos promotores de saúde (Sagar, 2018). O termo resíduo de frutas e verduras (RFV) é usado para designar todas as partes de frutas e verduras descartadas durante os processos agrícolas e industriais, distribuição e fase de consumo da cadeia alimentar, que podem ser comestíveis ou não comestíveis, e posteriormente podem ser processados e valorizados de diversas formas, (Esparza, 2020). Em sua pesquisa com digestão anaeróbia termofílica em dois estágios, Schievano et al., 2012, utilizou uma mistura de esterco de porco e resíduo biológico de supermercado comparando produção energética e eficiência de biodegradação.

Em sua revisão sobre a utilização de resíduo de frutas e verduras para a produção de produtos com valor agregado, Ganesh et al., 2022, apontaram o potencial de aplicações convencionais e emergentes para o manejo de resíduo de frutas e verduras em diferentes setores. Com aplicações convencionais são necessários grandes volumes de resíduos de frutas, havendo a valorização de produtos, porém ainda apresentando impactos como a emissão de gases e geração de resíduo sólido. Assim, destaca-se a utilização de RFV para conversão em energia, disposição em aterros, alimentação de animais, compostagem e tratamento enzimático. Já as aplicações emergentes, se destacam pela utilização de menores volumes de resíduos de frutas e verduras, com mais sustentabilidade e valor agregado, como por exemplo, compostos nutracêuticos, aromatizantes, compostos bioativos em embalagens e resíduo de nanopartículas.

A digestão anaeróbia surge como uma possibilidade viável para o tratamento do RFV por ser ótima para o tratamento de resíduos facilmente biodegradáveis e com alto teor de umidade. A DA é um processo catalisador microbiano envolvendo a decomposição de matéria orgânica por uma mistura de complexa de microrganismos na ausência de oxigênio, resultando predominantemente em biogás e efluente rico em nutrientes (Magama et al., 2022).

A digestão de RFV possui vantagens e desvantagens inerentes às características desses compostos. O RFV é caracterizado por possuir um alto teor de umidade, poucos sólidos totais (ST) e muito sólidos voláteis (SV), apresentando a vantagem de ser uma forte matéria prima

para a DA, visto que, para a DA o mais adequado são matérias orgânicas com alto teor de umidade ou resíduos semi-sólidos (Agrawal et al., 2022).

Em sua pesquisa, Edwiges et al. (2020), utilizaram o processo de DA a partir de uma mistura de RFV em reator CSTR operado sob condições mesofílicas (37 °C). Com isso, foi realizado o monitoramento do desempenho do reator com o aumento gradual da taxa de carregamento orgânico (TCO) de 0,5 gVS.L<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> até 5,0 gVS.L<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>. Nesse contexto, observaram um processo estável durante a TCO de 5,0 gVS.L<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> atingindo a maior taxa de produção de biogás (TPB) (1.55 L<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>) e TDH de 24 dias. Contudo, o melhor desempenho registrado foi na TCO de 3,0 gVS.L<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> com um rendimento de metano (RM) de 285 L<sub>N</sub> CH<sub>4</sub>.kg<sub>VS</sub><sup>-1</sup> e eficiência de remoção de matéria orgânica com 79% de biodegradabilidade do substrato. Além disso, nas TCO acima de 3,0 gVS.L<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> começou a ser observado o acúmulo de ácidos orgânicos voláteis, principalmente ácido propiônico com concentrações acima de 1,000 mg L<sup>-1</sup> durante a última TCO (5,0 gVS.L<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>), sendo um indicativo do limite operacional para digestão exclusiva desse tipo de substrato. Dessa forma, com os resultados de sua pesquisa, eles concluíram que a digestão anaeróbia de uma mistura de RFV altamente diversificada é viável e possui um imenso potencial que não é amplamente utilizado em países desenvolvidos.

Lin et al. (2011), em sua pesquisa, trabalhou com a co-digestão anaeróbia de frutas e verduras. Nesse contexto, eles utilizaram um reator CSTR sob condições mesofílicas (35 °C), com uma TCO de 3,0 kg VS/m<sup>3</sup>.dia. A partir disso, investigaram a performance do reator em diferentes etapas, realizando a variação das taxas de mistura entre RFV e resíduos alimentares (RA). Eles observaram que, alimentando o reator apenas com RFV e operando com uma TCO de 3 kg VS/m<sup>3</sup>.dia, conseguiram alcançar uma TPB de 2,17 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.dia e um RM de 0,42 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS. Contudo, a DA usando somente o RA falhou em decorrência do acúmulo de ácidos orgânicos. Dessa forma, após os testes de diferentes taxas de mistura entre os resíduos (RFV:RA), verificou-se que a melhor taxa foi a de 1:1, na qual obtiveram uma eficiência de remoção de DQO de 96,1% e um rendimento da produção de metano de 0,49 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS. Assim, puderam concluir que a utilização do RFV trouxe benefícios para a estabilidade do processo anaeróbio e incrementou a produção de biogás e a remoção de matéria orgânica do reator.

Bouallagui et al. (2004), estudaram a digestão anaeróbia em dois estágios, de uma mistura de RFV e utilizou reatores anaeróbios em bateladas sequenciais (ASBR) operando sob condições mesofílicas (35 °C). O experimento foi dividido em três etapas, com cargas de 3,7g, 7,5g e 10,1g DQO/L.d, respectivamente. Com isso, observaram que o melhor resultado

para o rendimento da produção de biogás ocorreu durante a segunda fase com 450 L/kg.DQO adicionada e uma conteúdo de metano de 71%. Enquanto o melhor desempenho de eficiência de remoção de DQO foi visto durante a terceira etapa, com uma remoção de DQO de 96%. Portanto, eles chegaram à conclusão que o RFV após a acidificação, sendo constituído principalmente por ácidos orgânicos, é altamente biodegradável e necessitando da separação de fases para aumentar o rendimento de todo o processo de digestão anaeróbia.

Shen et al. (2013), trabalharam com a co-digestão anaeróbia de RFV e RA em um reator CSTR mesofílico, com temperatura de 35 °C. Com isso, para o reator de estágio único, foram analisadas cinco TCO (1,0g, 2,0g, 2,5g, 3,0g e 3,5g SV.L<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>). E durante a etapa de dois estágios, o reator era alimentado com o efluente acidificado produzido na etapa de acidogênese. Dessa forma, na etapa de metanogênese, houve foram analisadas cinco TCO (1,0g, 2,0g, 3,0g, 4,0g, 5,0g SV.L<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>). A partir disso, eles verificaram que o reator em estágio único apresentou desempenho satisfatório apenas para TCO < 2,0g SV.L<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>, com destaque para TCO de 0,5g SV.L<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>, na qual produziu 0,544 L (g SV)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>. Contudo, com o aumento da TCO > 2,0g SV.L<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>, a produção começou a diminuir e o reator apresentou problemas de estabilidade em decorrência do acúmulo de ácido orgânicos. Já no reator em dois estágios, foi constada uma maior produção de metano (0,351-0,455 L (g SV)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>) e maior estabilidade para o sistema. Portanto, puderam constatar que o reator em dois estágios apresentar maior capacidade de tamponamento em altas TCO acima de 4,0g SV.L<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> e altas TCO implicam em maior capacidade de tratamento para um mesmo volume e consequentemente, maiores benefícios econômicos.

A partir das comparações realizadas acima, fica evidente que o processo de DA em dois estágios apresenta mais vantagens do que o processo em estágio único. Visto que, o RFV possui uma alta biodegradabilidade em decorrência de fatores como o seu alto teor de umidade. Além disso, o tratamento desse tipo de resíduo possui grande facilidade para acumular ácidos orgânicos voláteis (AGV), graças a sua rápida degradação e alta concentração de carboidratos, provocando a diminuição do pH do sistema e gerando inibição das atividades metanogênicas (Chatterjee e Mazumder, 2020). Portanto, a utilização do RFV aliada a digestão anaeróbia em dois estágios, proporciona maiores rendimentos para o processo como um todo.

### 3.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A DA consiste em um processo metabólico complexo que necessita de condições anaeróbias e do trabalho conjunto de associações de microrganismos para transformar matéria orgânica em metano e dióxido de carbono (Airton Kunz, 2019). O biogás além de ser composto principalmente por metano e dióxido de carbono, apresenta frações menores de outros gases, como por exemplo, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e NH<sub>3</sub> (Chen et al., 2015). Esse processo biológico ocorre em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

De acordo com Yadvika et al. (2004), na hidrólise, ocorre a transformação da matéria orgânica mais complexa, com moléculas insolúveis e de grandes massas (carboidratos, proteínas e lipídios) em compostos orgânicos mais simples e solúveis (açúcares, aminoácidos, ácidos orgânicos de cadeia longa) através da liberação de enzimas por bactérias fermentativas.

Na acidogênese os monômeros formados durante a hidrólise são degradados a ácidos orgânicos de cadeia curta, álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono. (Airton Kunz, 2019).

Segundo Airton Kunz (2019), a acetogênese é realizada por bactérias denominadas acetogênicas que estabelecem uma relação de sintrofia com as arqueias metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas. Durante esse processo, os ácidos orgânicos de cadeia longa são transformados em ácidos com um ou dois átomos, como por exemplo, o ácido fórmico e acético, com a consequente produção de hidrogênio e dióxido de carbono. A reação é regida pelas bactérias homoacetogênicas com o consumo de hidrogênio e gás carbônico para a formação de acetato (Equação 1), sendo precursora para metanogênese. A cooperação entre diferentes grupos de microrganismos é de fundamental importância para a viabilidade da produção de acetato a partir de ácidos orgânicos.



Durante a etapa metanogênica, ocorre a produção de metano o biocombustível gerado a partir da atividade das arqueas metanogênicas em ambiente estritamente anaeróbio. As arqueas metanogênicas utilizam H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, ácido fórmico ou acetato como substrato energético para crescer e sobreviver (Agrawal et al., 2022). As espécies metanogênicas são divididas em acetoclásticas e hidrogenotróficas de acordo com sua via metabólica. Dessa forma, as

metanogênicas acetoclásticas (ex: *Methanosarcina*) convertem acetato a metano e as hidrogenotróficas (ex: *Methanobacterium*) fazem a conversão do dióxido de carbono e hidrogênio a metano (Airton Kunz, 2019).

De acordo com Agrawal et al. (2022), para um bom desempenho da comunidade microbiana são necessárias ótimas condições ambientais, pois os microrganismos são suscetíveis às mudanças ambientais. Assim, a produção de biogás depende de diversos fatores como temperatura, pH, características dos substratos, inóculo, carga orgânica volumétrica, relação carbono/nitrogênio (C/N), concentração de ácidos graxos voláteis (AGV), tempo de detenção hidráulica (TDH) e o tipo de reator.

### 3.2.1 Temperatura

O monitoramento das condições de temperatura do reator é de vital importância para a DA na medida em que afeta a atividade metabólica dos microrganismos, taxas de reações, processos cinéticos, processos de estabilidade e o rendimento dos produtos (Mir et al., 2016). A DA pode ser classificada em mesofílica e termofílica dependendo da sua temperatura de operação. A mesofílica abrange os intervalos de 25 a 35 °C, enquanto a termofílica opera entre 55 e 65 °C (Bouallagui et al., 2004). Diversos autores apontam que a temperatura ideal para operação de reatores mesofílicos é por volta de 35 °C, enquanto a temperatura ideal para termofílicos fica em torno de 55 °C (Hartmann e Ahring, 2006; Kim et al., 2002).

Existe um consenso, na literatura, de que a operação de reatores em condições termofílicas é mais vantajosa e apresenta maior rendimento na produção de biogás do que sob condições mesofílicas. Segundo Agrawal et al. (2022), isso pode ser decorrente do aumento das taxas de hidrólise e acidogênese, que aumentam a biodegradabilidade dos resíduos e consequentemente aumenta a produção de biogás.

### 3.2.2 pH

Ward et al. (2008), observaram em sua pesquisa que o pH ideal para a DA se encontra entre 6,8 e 7,2, visto que os microrganismos responsáveis por cada etapa desse processo apresentam seus valores ideias de pH. Nesse contexto, ao considerar um sistema em dois estágios, segundo Yu e Fang, (2002), trabalharam com a acidificação de resíduo de laticínios em um reator contínuo mesofílico e observaram que um reator responsável pela etapa acidogênica pode ser operado em uma faixa de pH 4 a 5,5, registrando boa conversão dos

AGV produzidos no processo. E, após a etapa acidogênica, antes da alimentação do reator metanogênico o efluente produzido na etapa anterior pode ser ajustado para faixa de pH 6,5 a 8,5, que representa a faixa de pH ideal para a metanogênese, com produção máxima em pH 7 (Mao et al., 2015; Mir et al., 2016), esse ajuste deve ser realizado para que não ocorra o estresse da comunidade microbólica. Por esses fatores, diversos autores preferem trabalhar com um sistema de reatores em dois estágios ou mais, buscando obter o melhor desempenho de cada etapa da DA através da adoção das condições adequadas para cada uma.

### 3.2.3 Características dos substratos

Durante a seleção do substrato as suas características devem ser analisadas atenciosamente. Dito isso, algumas características do substrato podem apresentar complicações à estabilidade do sistema como: teor de sólidos totais, concentração de nitrogênio e amônia, sulfato, metais pesados (Ribeiro, 2004; Rocamora et al., 2020).

Primeiramente, a DA pode ser realizada em dois processos, seco ou líquido, dependendo do conteúdo de sólidos totais (%ST) presente no substrato (Rico et al., 2020). A partir disso, as tecnologias de tratamento podem ser divididas em: líquida (<10% ST), semi seca (10-20% ST) e seca (20-40% ST) (Braguglia et al., 2018). Com o exposto, altos teores de sólidos (DA seca) podem gerar baixa produção de metano e o acúmulo de inibidores (Rocamora et al., 2020). Além disso, a baixa umidade presente no substrato é considerada uma das razões para o problema de difusão entre o gás e o líquido e do acúmulo de fatores inibitórios. Visto que, ocorre a redução do substrato para a biomassa microbiana afetando seu metabolismo.

Nesse contexto, a DA é largamente utilizada para tratar resíduos orgânicos como resíduo verde, agrícola, alimentícios ou a fração orgânica do resíduo sólido municipal (FORSM) (Rocamora et al., 2020). Dessa forma, o tratamento de matérias primas como resíduos alimentícios e FORSM são frequentemente prejudicados, pois apresentam em sua composição baixa taxa de C/N que pode gerar acúmulo de nitrogênio na forma de nitrogênio amoniacal total (NAT) (Yirong et al., 2017). O crescimento de NAT no sistema é problemático na medida em que está presente na forma de amônia livre e amônio. Essa amônia livre é considerada como a forma mais tóxica, se espalhando facilmente pela parede celular dos microrganismos causando desequilíbrio (Kayhanian et al., 1999).

De acordo com Machado (2012), para substratos contendo altas concentrações de sulfato, ocorre a produção de sulfeto através das bactérias redutoras de sulfato. O sulfeto

produzido é considerado muito reativo e corrosivo, além de ser tóxico para microrganismos e seres vivos. Nesse processo, a inibição pode vir tanto pela formação do sulfeto quanto pela competição por substrato por parte das bactérias redutoras de sulfato e os microrganismos responsáveis pela DA (Harada et al., 1994).

Muitos metais pesados fazem parte das enzimas presentes em reações bioquímicas anaeróbias. Contudo, os metais pesados são bioacumuladores e não biodegradáveis, ocorrendo o seu acúmulo até concentrações que passam a apresentar toxicidade. Zayed e Winter (2000) afirmam que essa toxicidade, está relacionada na maioria dos casos a fatores como pH e potencial redox.

Tomando o foco para as características do RFV, eles são substratos que possuem alto teor de umidade (80-90%), altamente biodegradáveis e ricos em amido, carboidrato, celulose, açúcar solúvel, minerais e ácidos orgânicos (Sharma et al., 2016; Kaur et al., 2019; Ferdes et al., 2019). Além disso, apresentam grandes quantidades de proteínas, lipídios, nutrientes, vitaminas fibras e minerais (Magama et al., 2022; Agrawal et al., 2022). Esse tipo de substrato possui, baixo teor de sólidos total e alto teor de sólidos voláteis, baixas concentrações de nitrogênio (Omre et al., 2018; Jiang et al., 2012). Contudo, de acordo com Liang e McDonald (2015), por apresentarem celulose e lignina (21,3% e 39,3% respectivamente), podem gerar a diminuição da produção de biogás, além de facilmente sofrerem processos de acidificação que podem causar inibição dos microrganismos responsáveis pela DA.

### 3.2.4 Inóculo

A seleção adequada do inóculo é de vital importância para a aceleração do start-up do reator. Essa aceleração ocorre através da introdução da população microbiana necessária para o novo substrato, proporcionando melhor digestão e aprimoramento dos microrganismos (Rocamora et al., 2020). Além da qualidade do inóculo e do tipo, a relação inóculo/substrato é um parâmetro fundamental para a DA (Assis e Gonçalves, 2022), na medida em que mede a quantidade de substrato pela quantidade de inóculo (Brown et al., 2013). Hobbs et al. (2018), apontou em seu trabalho que a proporção adequada de substrato para inóculo fornece ao reator capacidade tampão para o reator, evitando que ocorra inibição pela queda de pH, favorecendo a produção de metano. A partir disso, na literatura são utilizados diversos valores para a proporção inóculo/substrato. Edwiges et al. (2020) utilizaram uma relação  $SV_{RFV}/SV_{inóculo} = 0,1$  para aclimatização da comunidade microbiológica e a relação inóculo/substrato com base em SV registrando uma taxa maior que 22. Já Farhat et al. (2018),

usaram como inóculo 20% do lodo de origem durante o *start-up* do reator. Enquanto, Megido et al. (2021), trabalharam com uma relação inóculo/substrato com base em SV em uma taxa de 2.

### **3.2.5 Carga orgânica**

Determina-se carga orgânica a quantidade de sólidos voláteis que podem ser introduzidos em um reator diariamente, sendo expressa em massa por unidade de volume e tempo (kg VS/m<sup>3</sup>d) (Mir et al., 2016). A carga orgânica pode ser afetada por diversos parâmetros como o tipo do substrato, a configuração do reator e o tipo de digestão (Agrawal et al., 2022). Esse parâmetro, afeta diretamente o desempenho do sistema, visto que o aumento da carga orgânica gera, até certo ponto, um aumento na produção de biogás e no rendimento de metano. Além disso, uma alta carga orgânica aplicada no sistema está associada com a formação de componentes inibitórios, desbalanceamento de nutrientes, acúmulo de ácidos e perturbação para os microrganismos, podendo gerar problemas ao sistema (Panigrahi e Dueby, 2019).

### **3.2.6 Relação C/N**

A relação C/N é responsável pela determinação da estabilidade e desempenho do reator. Dessa forma, é necessário que haja uma condição ótima na relação C/N, com o objetivo de garantir o balanço de nutrientes adequado para o consórcio de microrganismos responsáveis pela DA, proporciona condições para o seu crescimento e a estabilidade do sistema (Agrawal et al., 2022). Altas taxas na relação C/N podem indicar um acúmulo de ácidos orgânicos no reator, levando a uma queda de pH e consequentemente a inibição da atividade das arqueas metanogênicas, fazendo com que a produção de metano seja prejudicada (Wang et al., 2012). De acordo com Mao et al. (2015), baixas taxas na relação C/N são um indicativo de excesso de nitrogênio no sistema, levando ao acúmulo de amônia no reator podendo ocasionar toxicidade aos microrganismos. Por isso, é necessário um controle pontual para manter a relação C/N em valores entre 20 e 30 (Rocamora et al., 2020), visando manter a estabilidade do sistema.

### **3.2.7 Ácidos graxos voláteis**

Ácidos graxos voláteis ou ácidos de cadeia curta são componentes intermediários formados na etapa de hidrólise, a partir da quebra de estruturas complexas, como ácidos de cadeias longas (Rocamora et al., 2022). De acordo com Ferdes et al. (2022), na etapa de acidogênese, bactérias acidogênicas convertem os produtos da etapa de hidrólise em AGV, sendo os mais comuns: o ácido acético, propiônico, butírico, valérico, álcool, NH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e outros produtos. Esse parâmetro é considerado um dos principais fatores que contribuem para a inibição da DA. Durante o caminho intermediário entre acidogênese e acetogênese pode ocorrer a formação excessiva de ácidos orgânicos, além da capacidade de consumo dos microrganismos, levando ao acúmulo e consequente queda do pH, acidificando o reator e inibindo a atividade das arquéias metanogênicas (Esparza et al., 2020). Nesse contexto, essa geração excessiva de AGV pode se tornar inibitória a partir de 2000 mg/L de ácido acético ou 8000 mg/L de AGV totais no sistema (Rocamora et al., 2020),

### **3.2.8 Tempo de Detenção Hidráulica**

Segundo Chatterjee e Mazumder (2019), o tempo de detenção hidráulica é um parâmetro operacional que possui influência sobre a DA e representa o tempo de residência da matéria bruta no reator. A partir disso, a aplicação de um TDH curto resulta em uma digestão ineficiente do substrato introduzido no sistema, levando a uma baixa atividade de microrganismos e a queda do rendimento de biogás (Li et al., 2019). Em contrapartida, a aplicação de um TDH muito alto resulta em maiores custos operacionais em decorrência da necessidade de reatores com maiores volumes (Van et al., 2020). O TDH ideal para tratar resíduos em condições mesofílicas segundo Mao et al. (2015) é entre 15 a 30 dias, visto que a obtenção de um TDH efetivo é dependente da composição do substrato e da carga orgânica.

### 3.3 TIPO DE REATOR

De acordo com Braúna (2012), o sistema úmido de baixa taxa é a configuração mais utilizada por possuir similaridade com os sistemas usados em estações de tratamento de esgoto para estabilização de anaeróbias de resíduos sólidos. Dito isso, esse tipo de configuração é largamente utilizado devido a sua facilidade de operação, porém com menor eficiência na produção de metano e baixo custo de investimento (Van et al., 2020). Na Tabela 2, encontra-se um compilado de todos os trabalhos realizados com reatores de mistura completa utilizando RFV nos últimos 10 anos.

Tabela 1 - Compilado de trabalhos com CSTR

Tipo de Resíduo	Modo de Operação	ST (%)	T (°C)	pH	TDH (dias)	Rendimento de biogás	TCO (kg VS/m <sup>3</sup> .d)	Remoção		Referências
								DQO (%)	Referências	
RFV	Semi-contínua	-	35	7,0 7,2	80	450 ml CH4.gSV <sup>-1</sup>	2	82	Ganesh et al. 2014	
RFV	Contínua	-	37 - 38	7,13 - 7,30	-	490 mL CH4.gSV <sup>-1</sup>	3,2	67,3	Cabbai et al. 2016	
Palha de milho, estrume de vaca e RFV	Semi-contínua	6	38	7,30 7,80	15	434.17 mL CH4.gSV <sup>-1</sup>	2,52	-	Wang et al. 2017	
RFV	Contínua	68,7 g/L	37	5,20 - 6,90	5,33 - 10	- 403 mL	1,84 - 3,44	91,1	Farhat et al. 2018	
RFV	Contínua	-	35	7,21	20	CH4.gSV <sup>-1</sup>	4,8	82	Arhoun et al. 2019	
RFV	Contínua	129 g/Kg	37	8,10	30	285 mL CH4.gSV <sup>-1</sup>	3	79	Edwiges et al., 2020	
Resíduo alimentar	Contínua	105,7 g/L	35	7,50	40	480 mL CH4.gSV <sup>-1</sup>	2,5	83,1	Jo et al. 2021	
RFV	Semi-contínua	30	30	7,00	34	312 mL CH4.gSV <sup>-1</sup>	1,0	82	Este estudo	
RFV	Semi-contínua	30	30	7,00	22	428 mL CH4.gSV <sup>-1</sup>	1,5	84	Este estudo	

Fonte: Autor

### 3.3.1 Reator de baixa taxa e resíduos de frutas e verduras

Reatores de baixa taxa que utilizam RFV como substrato trabalham com teores de sólidos variados devido à heterogeneidade desse tipo de substrato como pode ser observado

no compilado da Tabela 2 acima. Quanto à carga orgânica aplicada, para sistemas de baixa taxa com o RFV sendo o único substrato, normalmente são adotadas TCO baixas, visto que esse tipo de resíduo por apresentar grande quantidade de carboidratos e alta biodegradabilidade, possui a tendência de gerar o acúmulo de ácidos voláteis em TCO elevadas causando sobrecarga e prejudicando o desempenho do reator.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

De acordo com os valores adotados pela literatura, foram estabelecidos valores para os parâmetros fixados neste trabalho, ou seja, os parâmetros que não sofreram alterações no decorrer da operação (temperatura, pH, tipo de reator). E, para os parâmetros que sofreram variações (TCO e TDH).

A temperatura é um parâmetro de grande importância quando se trata do processo de DA, visto que tem a capacidade de influenciar nas reações e proporcionar um aumento da produção de biogás (Agrawal et al., 2020). Por isso, a escolha da temperatura adequada pode garantir um melhor desempenho desse processo. De acordo com Hartmann e Ahring (2006) e Kim et al. (2002), a temperatura ideal para condições mesofílicas é por volta de 35 °C, enquanto para as condições termofílicas seria por volta de 55 °C, porém a literatura aponta um maior desempenho para sistemas que trabalham sob condições termofílicas. Contudo, esse processo térmico necessita de um sistema de aquecimento que exige um gasto energético considerável. Além disso, o inóculo precisa passar por um processo de adaptação térmica cuidadosa para que a comunidade bacteriana consiga se adaptar as novas condições, em caso de inóculo não adaptados. Dessa forma, a operação dos reatores do presente trabalho foi realizada sob condições mesofílicas (temperatura ambiente) a 30 °C.

A escolha da melhor faixa de pH para trabalhar com DA em dois estágios já foi amplamente estudada na literatura. Para o processo de DA como um todo uma faixa de pH entre 6,8 e 7,0 já é um valor aceitável (Ward et al., 2008). Contudo, se tratando de um processo em dois estágios em que ocorre a divisão das etapas, é necessário ter uma atenção maior as faixas de pH ideias para cada etapa. Com isso, Mao et al. (2015) e Mir et al. (2016) apontam que para uma etapa metanogênica mais eficiente deve-se adotar uma faixa de pH entre 6,5 e 8,5, apresentando uma produção máxima em pH 7,0. E, para a etapa acidogênica a faixa ideal se encontra entre pH 5,5 e 6,5. Tomando isso como referência, o trabalho em questão adotou um pH 7,0 para o reator CSTR metanogênico. E, para o CSTR acidogênico foi adotado um pH 4,5.

Na literatura são encontradas diversas configurações de reatores para o tratamento de resíduos através da DA. Dessa forma, o sistema úmido de baixa taxa é uma das configurações mais utilizadas devido a sua facilidade de operação, custo reduzido e similaridade com os sistemas utilizados em sistemas de tratamento de esgoto (Braúna, 2012; Van et al., 2020). Nesse contexto, para o presente trabalho foi escolhido o sistema úmido de baixa taxa justamente pelos motivos citados acima. Dessa forma, o objetivo foi avaliar o desempenho dessa configuração de CSTR metanogênico mesofílico e verificar se é uma opção economicamente viável para o tratamento de RFV.

A TCO afeta diretamente o desempenho do sistema, pois o aumento da carga orgânica proporciona, até certo ponto, o aumento da produção de biogás. De acordo com Agrawal et al. (2022), esse parâmetro é afetado por diversos outros parâmetros como o tipo do reator, a composição do substrato e o tipo de digestão que está sendo realizada. Contudo, uma alta TCO está relacionada ao acúmulo de ácidos orgânicos voláteis e desbalanceamento de nutrientes gerando perturbações ao sistema, segundo Panigrahi e Dueby (2019). Dessa forma, o trabalho em questão optou pela adoção do aumento da TCO: 1,0, 1,5 e 2,5 kg DQO m<sup>-3</sup>d<sup>-1</sup>. Esse aumento foi escolhido tendo como objetivo avaliar até que ponto o CSTR metanogênico mesofílico é uma alternativa viável para o tratamento de RFV, assim como avaliar até que carga orgânica essa configuração de reator mantém um desempenho estável da sua produção de metano.

O TDH por se tratar do tempo de residência da matéria bruta no reator, possuindo grande influência no processo de DA. De acordo com Li et al. (2019) e Mao et al. (2015), um baixo TDH resulta em uma digestão ineficiente do substrato e gera uma baixa atividade de microrganismos, causando uma queda no rendimento de biogás. E, um alto TDH aumenta os custos operacionais por necessitar de reatores com maiores volumes. Dessa forma, Mao et al. (2015) aponta que o melhor TDH para tratar resíduos em condições mesofílicas fica em torno de 15 a 30 dias, porém o TDH ideal varia de acordo com a composição do substrato e a carga orgânica adotada. A partir disso, no presente trabalho foi realizado o aumento da TCO pelo decréscimo do TDH (34, 22 e 16 dias), para que fosse possível realizar a operação com maior massa de resíduo por unidade de reator, resultando, assim, em reatores com menores volumes. Essa escolha foi feita visando avaliar como seria o desempenho do reator CSTR mesofílico, trabalhando com o aumento da TCO, visto que o RFV utilizado como substrato neste trabalho é um resíduo muito heterogêneo.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 REATOR DE AGITAÇÃO CONTÍNUA

#### 4.1.1 Reator CSTR metanogênico

O Reator de Mistura Completa ou *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR) metanogênico foi construído em Policloreto de Vinila, com 60 cm de altura, 25 cm de diâmetro e um volume útil de 13 litros (Figura 1). O reator foi mantido em temperatura ambiente (30 °C), sob agitação semi-contínua (120 RPM), por meio de um misturador em forma de pá vertical, com intervalos de agitação de 2 horas, para potencializar a produção de biogás. O reator contava com uma bolsa de biogás que tinha o intuito de prevenir contaminação do sistema com ar atmosférico.

#### 4.1.2 Reator CSTR acidogênico

O reator CSTR acidogênico foi construído em acrílico, com 23 cm de altura e 37,3 cm de diâmetro e um volume útil de 2 litros (Figura 1). Assim como o CSTR metanogênico ele foi mantido em temperatura ambiente, sob agitação semi-contínua (120 RPM), através de um misturador em forma de pá vertical após a adição de alimento para garantir maior homogeneização do substrato com o lodo.

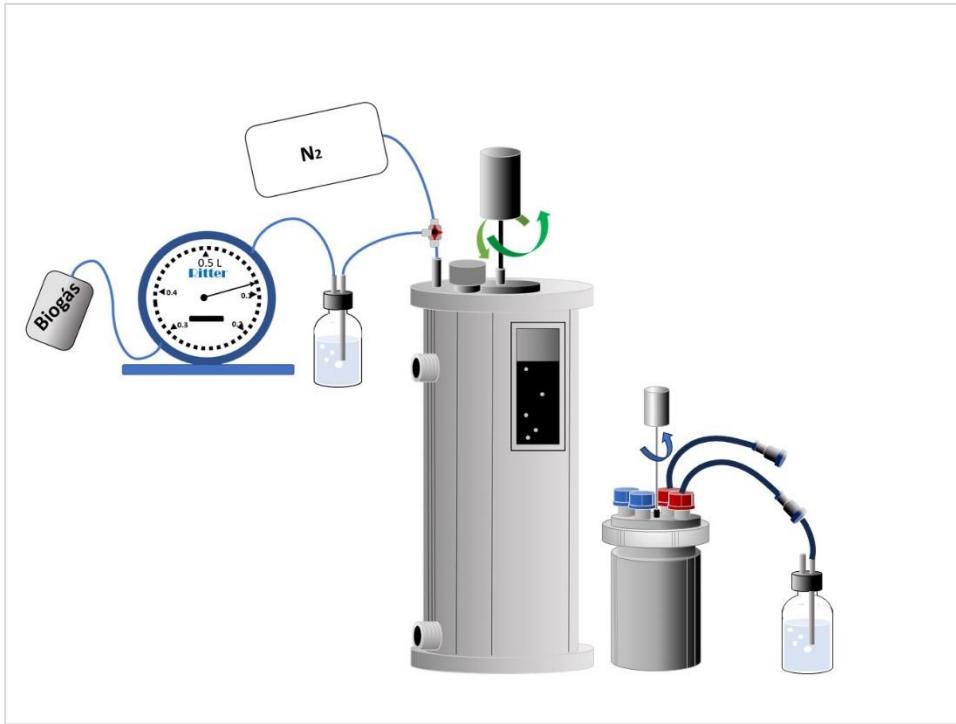


Figura 1 - Esquema dos reatores CSTR utilizados

#### 4.2 RESÍDUO DE FRUTAS E VERDURAS E FONTE DO INÓCULO

O RFV utilizado na alimentação do CSTR foi coletado na Central de Abastecimento do Ceará (Maracanaú, Ceará). A caracterização da composição dos resíduos foi detalhada por Silva-Júnior (2022). O RFV possui em sua composição: laranja (42%), cebola (7,7%), milho (5,5%), mamão (5,4%), melancia (3,4%), abacate (4,8%), melão (3,1%), abacaxi (3,1%), banana (3,0%), batata (3,0%), repolho (2,4%), goiaba (1,2%), tomate (1,0%), pimentão (0,9%), maçã (0,7%), beterraba (0,9%), maracujá (0,4%), abóbora (0,2%) e cenoura (0,4%).

A caracterização do RFV consistiu inicialmente no preparo de uma diluição de 50g do RFV triturado para 1L de água destilada. Essa amostra foi homogeneizada a 10.000 rpm por cerca de 10 a 15 min (Ultra-Turrax T25, IKA Labortechnik) para minimizar possíveis erros analíticos decorrentes da diferença de dimensões dos resíduos. A caracterização desses resíduos foi feita a partir de análises de demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), nitrogênio total Kjeldahl, carboidratos totais e nutrientes. A partir da caracterização, foi possível verificar que o RFV em questão apresentava uma DQO total de  $138,13 \pm 12,40$  g/kg PL (peso líquido) e uma concentração de sólidos totais de  $13,00 \pm 0,20$  % (Silva-Junior et al., 2021). A tabela 3 a seguir, contém o resultado completo da caracterização do RFV utilizado neste trabalho.

Tabela 2 - Caracterização do RFV

Parâmetro	Valor	Unidade
DQO total	138,13	g/kg pu
Sólidos totais	13,00	%
Umidade	86,90	%
Sólidos voláteis	94,10	% ST
Carboidratos	55,0	% pu
Lipídios	0,80	% pu
Proteínas grosseiras	2,25	% pu
Nitrogênio total Kjedahl	9,3	g/kg ps
Fósforo total	0,29	g/kg ps
Potássio	3,00	g/kg ps
Cálcio	0,90	g/kg ps
Magnésio	0,67	g/kg ps
Enxofre	0,60	g/kg ps
Sódio	5,22	mg/kg ps
Cobre	21,11	mg/kg ps
Ferro	242,19	mg/kg ps
Zinco	23,09	mg/kg ps
Manganês	10,16	mg/kg ps

Legenda: pu: peso úmido; ps: peso seco;

#### 4.2.1 Resultado de sólidos totais e voláteis do lodo

O lodo utilizado como inóculo dos dois reatores foi retirado de um reator mesofílico utilizado para tratamento de efluente da cervejaria Heineken (Maranguape, Ceará). Na Tabela 4 a seguir, estão expostos os resultados da análise de ST e SV realizada, na qual foi possível verificar que o lodo mesofílico coletado apresentou uma concentração de sólidos totais com média igual a 0,97 g/mL e uma concentração de sólidos voláteis com média igual a 0,02 g/mL e um pH 7,5.

Tabela 3 - Resultado de ST, SF e SV

Sólidos Totais (g/mL)	Sólidos Fixos (g/mL)	Sólidos Voláteis (g/mL)
0,97	0,96	0,02
0,97	0,96	0,02
0,98	0,95	0,03
0,97	0,95	0,02

## 4.3 OPERAÇÃO DOS REATORES CSTR

### 4.3.1 Operação em estágio único

A operação do CSTR metanogênico foi realizada a partir da avaliação do aumento da taxa de carregamento orgânico (TCO) em três condições operacionais: 1,0, 1,5 e 2,0 kg DQO m<sup>-3</sup>d<sup>-1</sup> com alimentação diária em cada condição operacional de 90g, 140g e 190g de RFV triturado, respectivamente. Os aumentos da TCO ocorreram a partir do momento em que era constatado que o reator havia atingido estabilidade na produção de metano e na eficiência de remoção de matéria orgânica, em cada uma das cargas. Esse aumento era feito em conjunto com o decréscimo do TDH de 34, para 22 e 16 dias, respectivamente, para as três cargas citadas acima.

### 4.3.2 Operação em dois estágios

A operação em dois estágios foi realizada a partir do sistema composto pelo CSTR acidogênico e do CSTR metanogênico.

O CSTR acidogênico foi operado com uma TCO de 15 kg DQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>, o RFV adicionado era digerido produzindo o efluente acidificado, que era armazenado em refrigerador (3 °C) e utilizado como alimento do CSTR metanogênico na etapa seguinte.

A partir disso, primeiramente, durante a etapa de transição entre estágio único e dois estágios, o CSTR metanogênico teve sua TCO reduzida para 1,0 kg DQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>, até que as condições observadas na etapa de estágio único, para essa mesma TCO, fossem atingidas novamente. Em seguida, deu-se início a alimentação do CSTR metanogênico com o efluente acidificado produzido na etapa de acidogênese pelo CSTR acidogênico. Neste momento, assim como ocorreu na etapa de estágio único, foi realizado o aumento da TCO em três

condições operacionais: 1,0, 1,5 e 2,5 kg DQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup> para se obter uma comparação de desempenho do sistema em estágio único e do sistema em dois estágios.

#### 4.4 ANÁLISES REALIZADAS

Durante a operação dos reatores eram realizadas análises diárias para a verificação do pH dos reatores. No efluente líquido dos dois reatores foram realizadas análises de alcalinidade a bicarbonato, ácidos voláteis totais, também diárias. E a produção volumétrica e a composição do biogás foram feitas apenas para o CSTR metanogênico. Além disso, foram realizadas análises semanais de ST, SF e SV dos dois reatores.

O pH era realizada com base no método potenciométrico seguindo o que estava determinado em (APHA, 2012), por meio de um medidor de pH de bancada. A determinação da alcalinidade total à bicarbonato e de ácidos voláteis totais, foi realizada seguindo o método de Ripley, Boyle e Converse (1986) e o método de DiLallo e Albertson (1961), respectivamente.

A análise da produção volumétrica do biogás foi realizada diariamente e era feita a partir da verificação de um medidor de gás Ritter do tipo tambor. O biogás produzido pelo CSTR metanogênico foi coletado em *bag* de armazenamento para a determinação da composição do biogás, por meio de cromatografia gasosa.

Os sólidos totais, fixos e voláteis eram analisados semanalmente a partir do efluente que era coletado todos os dias dos dois reatores. Dessa forma, as análises foram realizadas pelo método gravimétrico de acordo com a American Public Health Association (2012). Os parâmetros analisados durante a operação são descritos na Tabela 5.

Tabela 4 - Análises realizadas, frequência e metodologias

Parâmetros físico – químicos	Frequência	Referências
pH (Potenciométrico)	Diariamente	APHA (2012)
Alcalinidade à bicarbonato	Diariamente	Ripley, Boyle e Converse (1986)
Ácidos voláteis totais	Diariamente	DiLallo e Albertson (1961)
Produção volumétrica de biogás	Diariamente	-
Composição do biogás	Diariamente	-
Sólidos totais, fixos e voláteis	Semanalmente	APHA (2012)

## 5 RESULTADOS

### 5.1 OPERAÇÃO EM ESTÁGIO ÚNICO

Durante esta fase da operação foi utilizado apenas um reator CSTR metanogênico de estágio único (CSTR-U). Na Figura 2 estão apresentados os valores médios de eficiência de remoção de matéria orgânica do CSTR operado em estágio único, o melhor desempenho foi registrado durante a primeira TCO de  $1,0 \text{ kgDQO.m}^3.\text{d}^{-1}$  com TDH de 34 dias, atingindo 82,15%. Contudo, com o aumento da TCO para 1,5 e  $2,0 \text{ kgDQO.m}^3.\text{d}^{-1}$  em conjunto com o decréscimo do TDH para 22 e 16 dias, houve redução na eficiência de remoção de matéria orgânica para 46,81% e 25,21%, respectivamente.

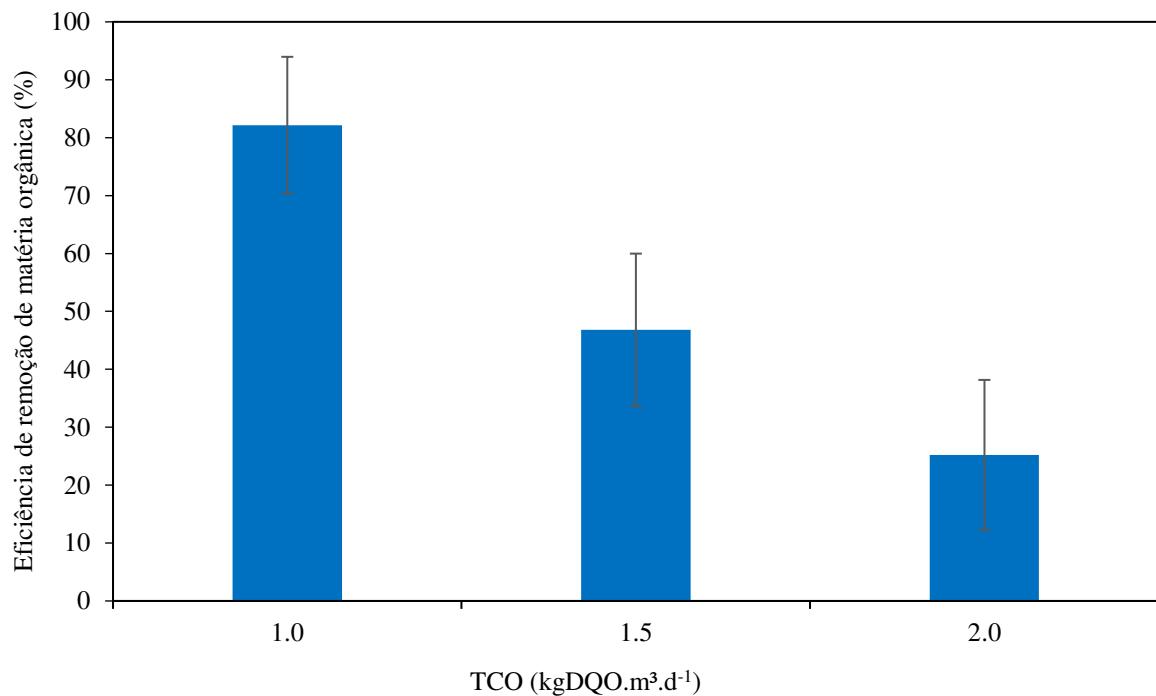


Figura 2 - Gráfico de Eficiência de remoção de matéria orgânica

Em conjunto com o aumento da TCO e a redução do TDH em cada etapa, ocorreu o aumento da concentração de AGV no reator, onde foi observada uma concentração de 934 mg HAc/L para TCO de  $1,0 \text{ kgDQO.m}^3.\text{d}^{-1}$  e 1296 e 2610 mg HAc/L para TCO de 1,5 e  $2,0 \text{ kgDQO.m}^3.\text{d}^{-1}$ , respectivamente. Isso pode ser decorrente de uma desarmonia na comunidade microbiológica, pois de acordo com Harirchi et al. (2022) as bactérias acidogênicas fermentativas, que realizam a conversão do substrato em ácidos orgânicos, apresentam um

crescimento mais acelerado que os demais microrganismos do processo de DA. Dessa forma, verificou-se que a redução do TDH não se mostrou eficiente e gerou sobrecarga ao reator, prejudicando a atividade metabólica das arqueas metanogênicas e fazendo com que a metanogênese fosse uma etapa limitante para o processo de DA.

O acúmulo de AGV e a instabilidade do processo de DA podem ter uma relação direta com a composição do RFV, que apresenta 55% de carboidratos, como exposto na Tabela 3, sendo um material de fácil degradação. Na literatura é possível verificar trabalhos de autores com resultados similares, que ao realizarem o aumento da TCO observaram o acúmulo de AGV. Edwiges et al. (2020), observaram o aumento na concentração total de AGV de  $390 \pm 21$  para  $983 \pm 25$  ao aumentar a TCO de 3,0 para  $3,5 \text{ g SV.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$  e o aumento de  $970 \pm 29$  para  $1,781 \pm 42$  durante o aumento da TCO de 4,0 para  $5,0 \text{ g SV.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$ . Enquanto isso, Farhat et al. (2018) observaram o aumento na concentração de AGV de  $2,4 \pm 0,03$  para  $11,8 \pm 0,15$  ao realizar o aumento da TCO de  $1,5 \pm 0,06$  para  $4,2 \pm 0,2 \text{ gSV/L/dia}$ .

A acidificação excessiva do reator pode prejudicar seu desempenho afetando a produção de biogás e até mesmo levar a inibição do processo de DA. Além disso, a instabilidade do reator observada durante a TCO de  $2,0 \text{ kg DQO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$  pode ser justificada pela alta relação entre alcalinidade intermediária e alcalinidade parcial (relação AI/AP) de 1,2. Para as TCO de 1,0 e 1,5 kg DQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup> foram registradas relações AI/AP de 0,3 e 0,4, respectivamente. E, de acordo com Ripley (1986), a relação AI/AP que indica estabilidade no sistema é representada pelo valor 0,3.

O RM e a produção volumétrica de metano (PVM) também apresentaram quedas com o aumento da TCO, sendo possível verificar o melhor resultado para os dois parâmetros na TCO de  $1,0 \text{ kg DQO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ , com  $312 \pm 45 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$  e  $0,339 \pm 0,056 \text{ L CH}_4 \text{ L}_{\text{reator}}^{-1}.\text{d}^{-1}$ , respectivamente (Figura 3 e 4).

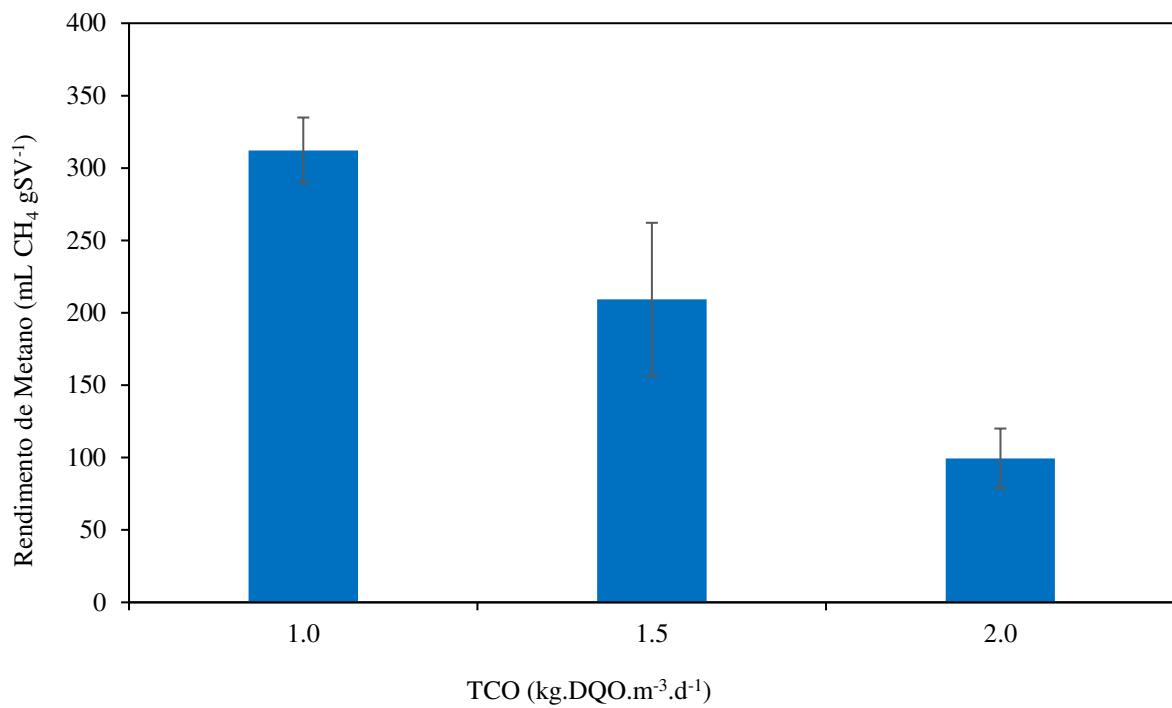


Figura 3 - Gráfico do rendimento de metano

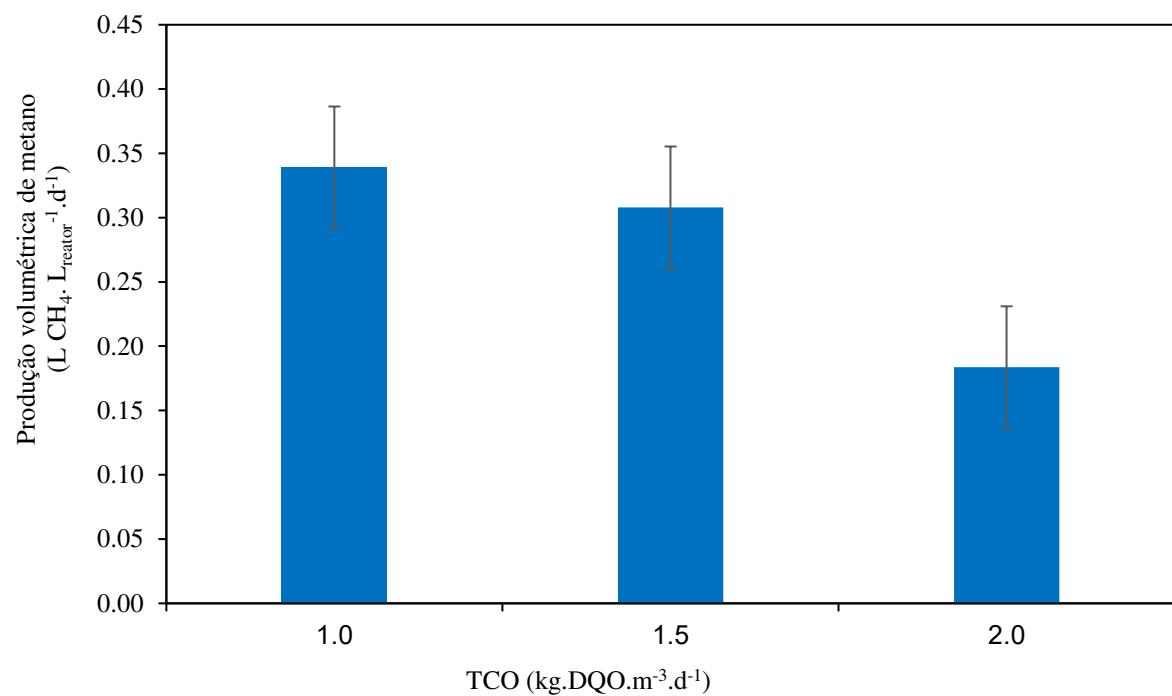


Figura 4 - Gráfico da produção volumétrica de metano

Como exposto nas Figuras 3 e 4, o aumento da TCO para 2,0 kg DQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup> ocasionou uma redução no RM e na PVM de 68% e 46%, respectivamente. Além disso, a composição de metano presente no biogás também sofreu prejuízo em decorrência do aumento da TCO. O melhor resultado para composição de metano também foi verificado durante a TCO de 1,0 kg DQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup> com 61% e reduziu para 56% e 36% na TCO de 1,5 e 2,0 kg DQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 5). Nesse contexto, é possível traçar uma relação entre o decréscimo do RM e o acúmulo de AGV registrados com o aumento da TCO. Dessa forma, podemos observar que durante a TCO mais alta de 2,0 kg DQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>, que apresentou os menores valores tanto para RM quanto para PVM, também demonstrou os maiores valores de AGV (2610 mg HAc/L<sup>-1</sup>). Com isso, fica evidente que os baixos valores obtidos para a produção de metano estão associados a elevadas concentrações de AGV no reator, pois altas concentrações de AGV no sistema tem ação inibitória para as arquéias metanogênicas, prejudicando a produção de CH<sub>4</sub> (Agrawal et al., 2022).

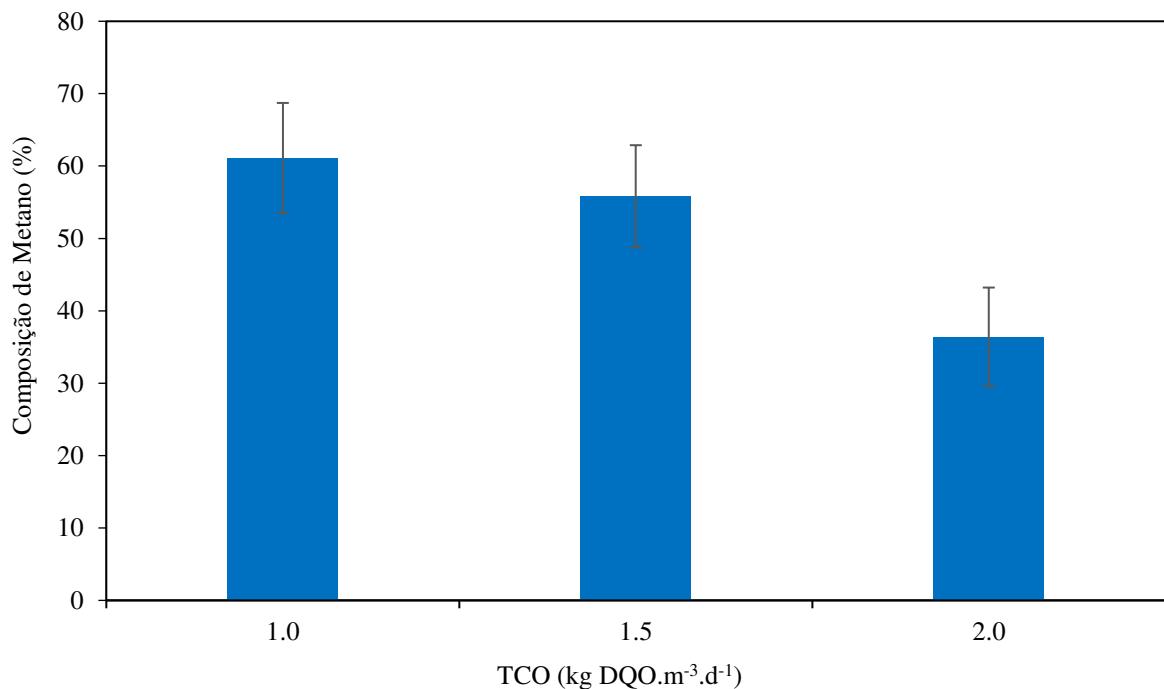


Figura 5 - Gráfico da composição de metano no biogás

Ganesh et al. (2014) trabalharam com a DA de RFV em reator mesofílico de estágio único realizando o aumento da TCO de 2,0 para 3,5 kgSV/m<sup>3</sup>.d com a redução do TDH de 80 para 45 dias, respectivamente e obtiveram um RM de  $0,45 \pm 0,03$  e  $0,47 \pm 0,04$  m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kgSV, para as duas TCO. Enquanto Mata-Alvarez e Llabrés (1992), observaram um RM de 0,47

L/gSV ao trabalharem com CSTR mesóflico de estágio único em uma TCO de 1,6 gSV/L.dia com TDH de 20 dias.

A partir dos resultados apresentados, pode-se observar que o desempenho do CSTR mesóflico de estágio único realizando a digestão de RFV se manteve dentro do esperado para um reator de baixa taxa trabalhando com esse tipo de resíduo. Resultados semelhantes aos do presente trabalho, que apresentou seu melhor desempenho durante uma TCO baixa (1,0 kg DQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>), já foram observados em outros trabalhos da literatura. Contudo, a configuração de estágio único não se mostrou vantajosa para o tratamento de RFV, em decorrência do seu baixo desempenho e da instabilidade no reator registrada a partir do aumento da TCO. Por isso, uma alternativa para solucionar esse problema é a adoção de um sistema em dois estágios, visando separar as etapas acidogênica e metanogênica, trazendo a possibilidade de fornecer as melhores condições as diferentes etapas da digestão anaeróbia.

## 5.2 OPERAÇÃO EM DOIS ESTÁGIOS

Durante a operação em dois estágios houve a separação das fases acidogênica e metanogênica. Esse processo ocorreu com a utilização de um CSTR acidogênico de primeiro estágio (CSTR-1), que era responsável pela acidificação do RFV. A partir disso, o efluente produzido pelo CSTR-1 era utilizado como alimento para o CSTR metanogênico de dois estágios (CSTR-2).

### 5.2.1 CSTR ACIDOGÊNICO

Neste ponto da operação o CSTR-1 foi utilizado para realização das etapas iniciais da digestão anaeróbia (hidrólise, acidogênese e acetogênese). A principal atividade do CSTR-1 foi a acidificação do RFV que serviria de alimento para o CSTR-2. O RFV é um resíduo que apresenta uma grande quantidade de carboidratos e proteínas em sua composição (Magama et al., 2022) e os carboidratos simples são convertidos em ácidos orgânicos durante a acidogênese, que são consumidos nas etapas seguintes da DA (Azevedo et al., 2023). Dessa forma, a partir das análises realizadas no efluente acidificado, foram encontrados ácido lático (HLa), ácido acético (HAc) e ácido isobutílico (HIsBu) em concentrações de 8082 mgHLa.L<sup>-1</sup>, 2586 mgHAc.L<sup>-1</sup>, 342 mgHIsBu.L<sup>-1</sup>, respectivamente. Wu et al. (2015), afirma em sua pesquisa que as bactérias acidogênicas apresentam maior atividade em torno de pH 4,0 e a produção de ácido lático sendo um produto indispensável da fermentação de RFV nessa faixa

de pH. O CSTR-1 apresentou um pH de 4,3 durante a operação, estando dentro da faixa ideal de pH que beneficia as bactérias acidogênicas.

Tabela 5 - Ácidos encontrados no CSTR-1

Ácido lático ( $\text{mgHLa.L}^{-1}$ )	Ácido acético ( $\text{mgHAc.L}^{-1}$ )	Ácido isobutírico ( $\text{mgHIsBu.L}^{-1}$ )
8048	2570	390
8715	2753	371
8330	2655	391
8262	2658	301
7392	2396	296
7746	2482	307
8082	2586	342

### 5.2.2 CSTR METANOGÊNICO

O efluente do CSTR-1 foi utilizado como alimento para o CSTR-2. Nesta etapa da operação, o reator teve sua TCO reduzida novamente para  $1,0 \text{ kg DQO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$  até que as condições operacionais observadas durante a etapa em estágio único fossem atingidas. A partir disso, foi realizado novamente o aumento da TCO para  $1,5$  e  $2,5 \text{ kg DQO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ . O melhor desempenho foi registrado na TCO  $1,5 \text{ kg DQO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$  com TDH de 22 dias, apresentando uma eficiência na remoção de matéria orgânica (Figura 6) de 84%, a concentração de AGV foi de  $793 \text{ mgHAc.L}^{-1}$  e uma relação AI/AP de 0,3. Com esses dados, é possível realizar uma comparação entre os melhores desempenhos observados do CSTR-2 (TCO  $1,5 \text{ kg DQO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ ) e do CSTR-U ( $1,0 \text{ kg DQO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ ). Com a adoção do processo em dois estágios pode-se constatar que o CSTR-2 apresentou maior desempenho e estabilidade do que o CSTR-U, havendo um aumento de 50% da TCO aplicada ao reator sem que a operação fosse afetada drasticamente. Contudo, ao realizar o aumento da TCO para  $2,5 \text{ kg DQO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$  e a redução do TDH para 12 dias, foi registrada uma queda no desempenho do reator com a redução da eficiência de remoção de matérias orgânicas de 84% para 26%, a concentração de AGV aumentou de  $793 \text{ mgHAc.L}^{-1}$  para  $1744 \text{ mgHAc.L}^{-1}$  e a relação AI/AP aumentou de 0,3 para 1,4, demonstrando que a estabilidade do reator foi afetada com o aumento da TCO.

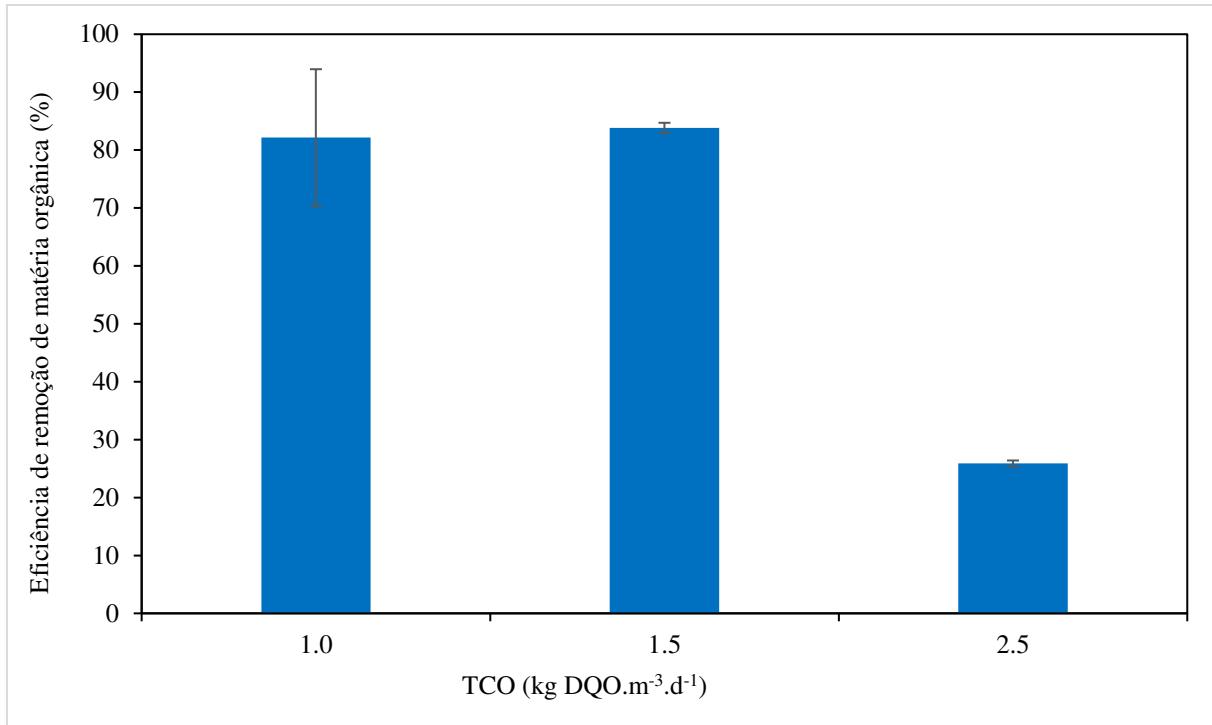


Figura 6 - Eficiência de remoção de matéria orgânica do processo em dois estágios

No que diz respeito à produção de biogás do CSTR-2, a TCO de 1,5 kg DQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup> a composição de metano (Figura 7) no biogás foi de 69%. Além disso, apresentou os melhores valores para o RM e a PVM, registrando  $428 \pm 81$  mL CH<sub>4</sub>.gVS<sup>-1</sup> e  $0,459 \pm 0,071$  L CH<sub>4</sub>.L<sub>reactor</sub><sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 8 e 9). Assim como ocorreu no CSTR-U, ao realizar o aumento da TCO para 2,5 kg DQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup> em conjunto com o decréscimo do TDH, ocorreu uma queda no desempenho do reator, reduzindo para 55% de metano na composição do biogás e com os menores valores de RM, PVM:  $157 \pm 74$  mL CH<sub>4</sub>.gVS<sup>-1</sup>,  $0,299 \pm 0,143$  L CH<sub>4</sub>.L<sub>reactor</sub><sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>, respectivamente. Esse aumento na TCO gerou uma sobrecarga no reator resultando em maiores níveis de AGV, instabilidades no sistema e, dessa forma, atingindo menores valores de RM e PVM. Edwiges et al. (2020), em sua pesquisa realizaram o aumento da TCO de 0,5 para 5,0 gVS.L<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> e durante o aumento da TCO de 3,5 a 5,0 gVS.L<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> (TDH 30 dias) observou uma queda no RM de  $262 \pm 14$  L<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> kgVS<sup>-1</sup> para  $198 \pm 17$  L<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> kgVS<sup>-1</sup>, essa redução ocorreu devido ao aumento da concentração de AGVs registrado com o aumento da TCO, gerando instabilidade no sistema. Veluchamy et al. (2019), observaram que ao aumentar a TCO de 6,5 para 8,5 kgVS.m<sup>-3</sup>d<sup>-1</sup> houve um pequeno aumento na produção de biogás de 145 para 181 L.d<sup>-1</sup>, contudo registrou um decréscimo no RM de 410 para 360 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> SV, assim como registrou também o aumento da concentração de AGV a medida em que a TCO era aumentada. Tomando como base os valores observados nos trabalhos acima e na literatura, é possível afirmar que independentemente do tipo de reator e

do TDH adotado, a TCO é um fator limitante de grande relevância para o tratamento mesofílico em dois estágios, afetando diretamente a produção de biogás.

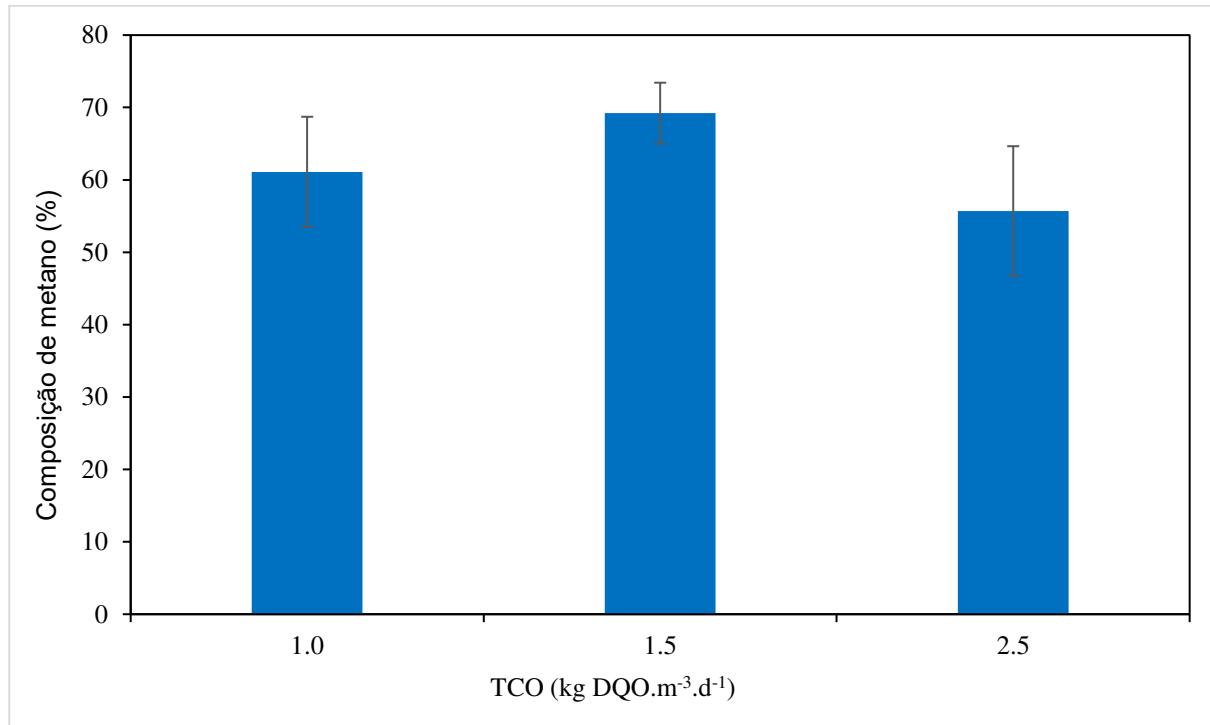


Figura 7 - Composição de metano do processo em dois estágios

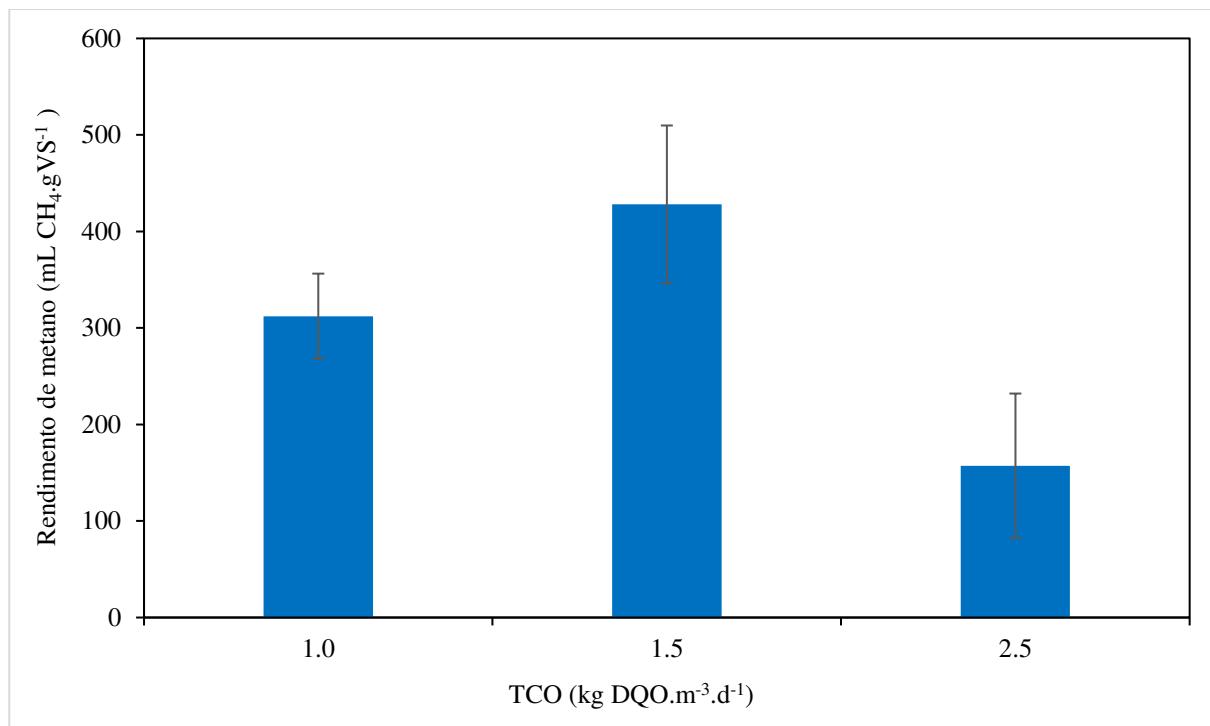


Figura 8 - Rendimento de metano do processo em dois estágios

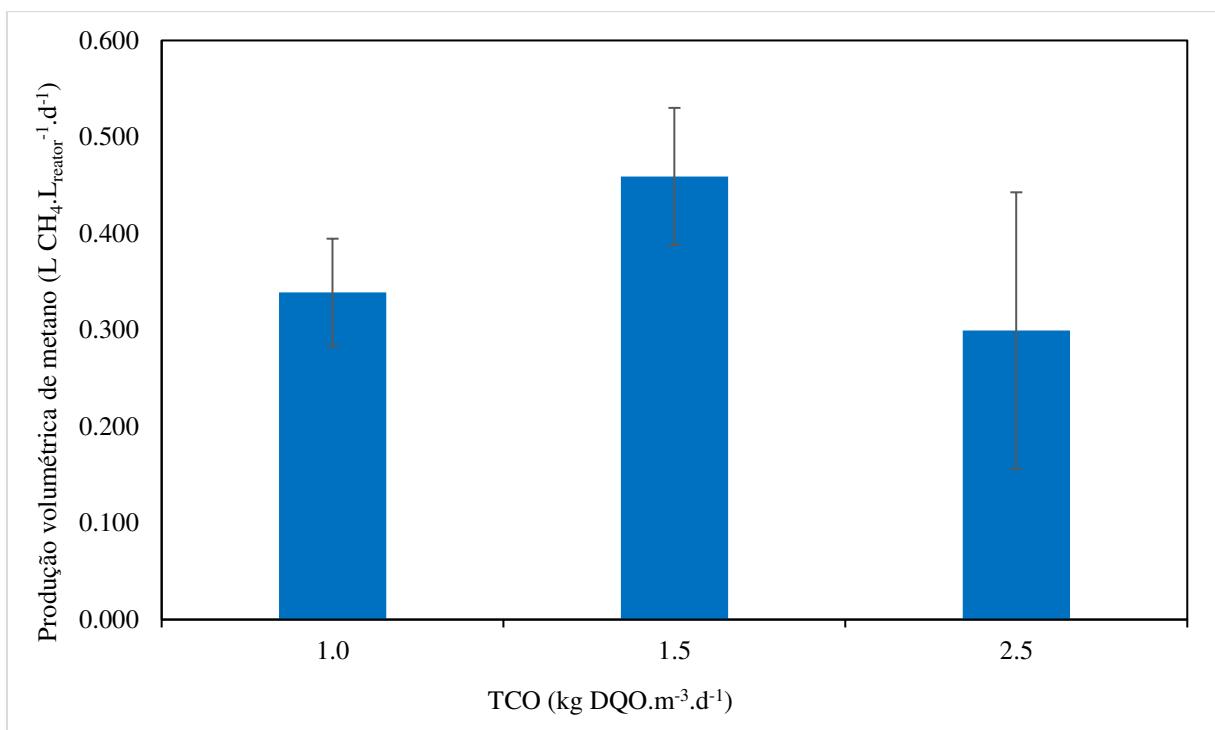


Figura 9 - Produção volumétrica de metano do processo em dois estágios

Comparando o processo em dois estágios com o de estágio único, foi possível verificar o processo em dois estágios proporcionou a adoção de um TDH total de 22 dias, sendo 2 dias do CSTR-1 e 20 dias do CSTR-2, correspondendo a um valor menor do que o adotado no processo de estágio único. Dessa forma, houve uma redução de 35% do volume total do CSTR-2 em relação ao CSTR-U, que consequentemente resulta em uma redução dos custos operacionais.

O CSTR é um tipo de reator amplamente utilizado devido a sua facilidade de operação e baixo custo (Van et al., 2020). Contudo, analisando os resultados do trabalho em questão e da literatura, é possível concluir que o CSTR não suporta altas TCO sem que ocorra prejuízo no seu desempenho e na estabilidade do sistema. Dessa forma, como o RFV é um resíduo gerado em larga escala e com uma quantidade abundante de carboidratos em sua composição, ele necessitaria de um tratamento com uma TCO elevada e essas condições causariam uma sobrecarga ao CSTR, ao tratar o RFV como único substrato, prejudicando a operação do reator. Uma alternativa para remediar esse problema seria a utilização de um co-substrato em conjunto com o RFV. Essa alternativa poderia proporcionar melhores condições para o processo de DA e possibilitar a adoção de TCO mais elevadas no CSTR.

## 6 CONCLUSÕES

Analisando os resultados do trabalho em questão é possível compreender que o processo de digestão anaeróbia em dois estágios apresentou o melhor desempenho no tratamento do RFV em relação ao processo em estágio único. Dessa forma, a separação das etapas acidogênica e metanogênicas proporcionou um ganho de 50% na TCO aplicada ao reator e permitiu a redução do volume total do CSTR em 35% em relação ao CSTR-U. Com relação à produção de biogás, os valores observados no processo em dois estágios do CSTR-2 também se mostraram mais vantajosos, visto que ele atingiu um RM e PVM de  $428 \pm 82$  mL  $\text{CH}_4 \cdot \text{gVS}^{-1}$  e  $0,459 \pm 0,071$  L  $\text{CH}_4 \cdot \text{L}_{\text{reator}}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , respectivamente. Contudo, mesmo com a adoção do processo em dois estágios a TCO máximo aplicada ao reator CSTR foi de apenas  $1,5 \text{ kgDQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ . Dessa forma, conclui-se que o CSTR pode não ser a configuração mais adequada para ao tratamento de RFV sendo o único substrato, pois esse tipo de resíduo é produzido em larga escala e apresenta uma grande quantidade de matéria orgânica em sua composição. Portanto, devido a sua produção em grandes quantidades, esse tipo de resíduo necessitaria de um tratamento com maiores TCO, o que resultaria em instabilidade e queda de desempenho no CSTR, tornando-o inadequado para esse tipo de tratamento. Nesse sentido, são necessários mais estudos relacionados ao tratamento desse tipo de resíduo e da adoção de alternativas de tratamento, como a separação do RFV em fração sólida e líquida, para a digestão em diferentes reatores de alta taxa, como por exemplo adotar um DRANCO para tratar a fração sólida e um UASB para tratar a fração líquida.

## REFERÊNCIAS

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2019..

AGRAWAL, Akanksha; CHAUDHARI, Parmesh Kumar; GHOSH, Prabir. Anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: a critical review of associated challenges. **Environmental Science And Pollution Research**, v. 30, n. 10, p. 24987-25012, 4 jul. 2022.

APHA. **Standard methods for the examination of water and waste water.** 22nd ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2012.

ASSIS, Tatiana Izato; GONÇALVES, Ricardo Franci. Valorization of food waste by anaerobic digestion: a bibliometric and systematic review focusing on optimization. **Journal Of Environmental Management**, v. 320, p. 115763, out. 2022.

AZEVEDO, André; LAPA, Nuno; MOLDÃO, Margarida; DUARTE, Elizabeth. Opportunities and challenges in the anaerobic co-digestion of municipal sewage sludge and fruit and vegetable wastes: a review. **Energy Nexus**, v. 10, p. 100202, jun. 2023.

BOUALLAGUI, H.; TORRIJOS, M.; GODON, J.J.; MOLETTA, R.; CHEIKH, R. Ben; TOUHAMI, Y.; DELGENES, J.P.; HAMDI, M. Two-phases anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: bioreactors performance. **Biochemical Engineering Journal**, v. 21, n. 2, p. 193-197, out. 2004.

BRAÚNA, Carlos Henrique da Costa. **Co-digestão anaeróbia de tortas de oleaginosas visando à produção de metano.** 2012. 157 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

BRAGUGLIA, C. M.; GALLIPOLI, A.; GIANICO, A.; PAGLIACCIA, P. Anaerobic bioconversion of food waste into energy: a critical review. **Bioresource Technology**, v. 248, p. 37-56, 2018.

BROWN, D.; LI, Y. Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production. **Bioresource Technology**, v. 127, p. 275-280, 2013.

CHATTERJEE, B.; MAZUMDER, D. New approach of characterizing fruit and vegetable waste (fvw) to ascertain its biological stabilization via two-stage anaerobic digestion (ad). **Biomass and Bioenergy**, v. 139, p. 105594, 2020.

CHEN, Xiao Yuan; VINH-THANG, Hoang; RAMIREZ, Antonio Avalos; RODRIGUE, Denis; KALIAGUINE, Serge. Membrane gas separation technologies for biogas upgrading. **Rsc Advances**, Canada, v. 5, p. 24399-24448, 17 fev. 2015.

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; reatores anaeróbios.** 1. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1997.

DILALLO, R.; ALBERTSON, O.E. Volatile acids by direct titration. **Water Pollut. Control Fed.**, v. 33, n. 4, p. 356-365, 1961.

EDWIGES, Thiago; FRARE, Laercio Mantovani; ALINO, João Henrique Lima; TRIOLO, Jin Mi; FLOTATS, Xavier; COSTA, Mônica Sarolli Silva de Mendonça. Methane potential of fruit and vegetable waste: an evaluation of the semi-continuous anaerobic mono-digestion. **Environmental Technology**, v. 41, n. 7, p. 921-930, 2 set. 2018.

ELMASHAD, H. et al. (2004). Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure. **Bioresource Technology**, 95(2), 191–201.

ESPARZA, Irene; JIMÉNEZ-MORENO, Nerea; BIMBELA, Fernando; ANCÍN-AZPILICUETA, Carmen; GANDÍA, Luis M. Fruit and vegetable waste management: conventional and emerging approaches. **Journal Of Environmental Management**, v. 265, p. 110510, jul. 2020.

ONU - Organização das Nações Unidas. **População mundial chegará a 8 bilhões em novembro de 2022.** Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/189756-popula%C3%A7%C3%A3o-mundial-cigar%C3%A1-8-bilh%C3%B3es-em-novembro-de-2022>. Acesso em: 20 nov. 2023.

FAO - Food and Agriculture Organization. **Mais 122 milhões de pessoas foram empurradas para a fome desde 2019 devido a múltiplas crises, revela relatório da ONU.** 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/en/c/1644602/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

FARHAT, Amel; MILADI, Baligh; HAMDI, Moktar; BOUALLAGUI, Hassib. Fermentative hydrogen and methane co-production from anaerobic co-digestion of organic wastes at high loading rate coupling continuously and sequencing batch digesters. **Environmental Science And Pollution Research**, v. 25, n. 28, p. 27945-27958, 30 jul. 2018.

FERDEŞ, Mariana; ZăBAVă, Bianca Ștefania; PARASCHIV, Gigel; IONESCU, Mariana; DINCă, Mirela Nicoleta; MOICEANU, Georgiana. Food Waste Management for Biogas Production in the Context of Sustainable Development. **Energies**, v. 15, n. 17, p. 6268, 28 ago. 2022.

GANESH, K. Selva; SRIDHAR, Adithya; VISHALI, S. Utilization of fruit and vegetable waste to produce value-added products: conventional utilization and emerging opportunities-a review. **Chemosphere**, v. 287, p. 132221, jan. 2022.

GANESH, Rangaraj; TORRIJOS, Michel; SOUSBIE, Philippe; LUGARDON, Aurelien; STEYER, Jean Philippe; DELGENES, Jean Philippe. Single-phase and two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: comparison of start-up, reactor stability and process performance. **Waste Management**, v. 34, n. 5, p. 875-885, maio 2014.

Haider, M. R., Zeshan, Yousaf, S., Malik, R. N., & Visvanathan, C.. Effect of mixing ratio of food waste and rice husk co-digestion and substrate to inoculum ratio on biogas production. **Bioresource Technology**, 190, 451–457, 2015.

Hartmann, H., & Ahring, B. K. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Influence of co-digestion with manure. **Water Research**, 39, 1543–1552, 2005.

Harada, H., Uemura, S., & Momonoi, K. Interaction between sulfate-reducing bacteria and methane-producing bacteria in UASB reactors fed with low strength wastes containing different levels of sulfate. **Water Research**, 28, 355–367, 1994.

HARIRCHI, Sharareh; WAINAINA, Steven; SAR, Taner; NOJOURI, Seyed Ali; PARCHAMI, Milad; PARCHAMI, Mohsen; VARJANI, Sunita; KHANAL, Samir Kumar; WONG, Jonathan; AWASTHI, Mukesh Kumar. Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen or volatile fatty acids (VFAs): a review. **Bioengineered**, v. 13, n. 3, p. 6521-6557, 25 fev. 2022.

Heo, N. H., Park, S. C., & Kang, H.. Effects of Mixture Ratio and Hydraulic Retention Time on Single-Stage Anaerobic Co-digestion of Food Waste and Waste Activated Sludge. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, 39(7), 1739–1756, 2004.

Hecht, C., & Griehl, C. Investigation of the accumulation of aromatic compounds during biogas production from kitchen waste. **Bioresource Technology**, 100(2), 654–658, 2009.

Hobbs, S. R., Landis, A. E., Rittmann, B. E., Young, M. N., & Parameswaran, P. Enhancing anaerobic digestion of food waste through biochemical methane potential assays at different substrate: inoculum ratios. **Waste Management**, 71, 612–617, 2018.

Jiang, Y., Heaven, S., & Banks, C. J. Strategies for stable anaerobic digestion of vegetable waste. **Renewable Energy**, 44, 206–214, 2012.

Kaur, P., Ghoshal, G., & Jain, A. Bio-utilization of Fruits and Vegetables Waste to Produce  $\beta$ -Carotene in Solid-State Fermentation; Characterization and Antioxidant Activity. **Process Biochemistry**, 2018.

Kayhanian, M. Ammonia Inhibition in High-Solids Biogasification: An Overview and Practical Solutions. **Environmental Technology**, 20(4), 355–365, 1999.

Kim, M., Ahn, Y.-H., & Speece, R. Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic. **Water Research**, 36(17), 4369–4385, 2002.

Li, Y., Chen, Y., & Wu, J. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. **Applied Energy**, 240, 120–137, 2019.

Liang, S., & McDonald, A. G. Anaerobic digestion of pre-fermented potato peel wastes for methane production. **Waste Management**, 46, 197–200, 2015.

LIN, Jia; ZUO, Jiane; GAN, Lili; LI, Peng; LIU, Fenglin; WANG, Kaijun; CHEN, Lei; GAN, Hainan. Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China. **Journal Of Environmental Sciences**, v. 23, n. 8, p. 1403-1408, ago. 2011.

LIU, Wan-Yu; LIAO, Bing. Anaerobic Co-Digestion of Vegetable and Fruit Market Waste in LBR + CSTR Two-Stage Process for Waste Reduction and Biogas Production. **Applied Biochemistry And Biotechnology**, v. 188, n. 1, p. 185-193, 7 nov. 2018.

MACHADO, Francisca Lívia de Oliveira. **Co-digestão anaeróbia de microalgas e de glicerol residual do biodiesel**. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

MAGAMA, Primrose; CHIYANZU, Idan; MULOPO, Jean. A systematic review of sustainable fruit and vegetable waste recycling alternatives and possibilities for anaerobic biorefinery. **Bioresource Technology Reports**, v. 18, p. 101031, jun. 2022.

Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 45, 540–555, 2015.

MASEBINU, S.O.; AKINLABI, E.T.; MUZENDA, E.; ABOYADE, A.O.; MBOHWA, C.. Experimental and feasibility assessment of biogas production by anaerobic digestion of fruit and vegetable waste from Joburg Market. **Waste Management**, v. 75, p. 236-250, maio 2018.

Mata-Alvarez J, Cecchi F, Llabrés P, Pavan P. Anaerobic digestion of the Barcelona central food market organic wastes: experimental study. **Bioresour Technol**, v. 39, 39–48, 1992.

MEGIDO, L.; NEGRAL, L.; FERNÁNDEZ-NAVA, Y.; SUÁREZ-PEÑA, B.; ORMAECHEA, P.; DÍAZ-CANEJA, P.; CASTRILLÓN, L.; MARAÑÓN, E. Impact of organic loading rate and reactor design on thermophilic anaerobic digestion of mixed supermarket waste. **Waste Management**, v. 123, p. 52-59, mar. 2021.

Mir, M. A., Hussain, A., & Verma, C.. Design considerations and operational performance of anaerobic digester: A review. **Cogent Engineering**, 3(1), 2016.

Omre, P.K., Singh, S. e Shikha. Waste utilization of fruits and vegetables - A review. **South Asian Journal of Food Technology and Environment**, 4 (1): 605-615, 2018.

Panigrahi, S., & Dubey, B. K. A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Renewable Energy**, 2019.

RIBEIRO, R. L. C. **Valorização Energética de Resíduos de Restauração por Digestão Anaeróbia**. Porto: Tese de Mestrado- Universidade de Porto, 2004.

ROCAMORA, Ildefonso; WAGLAND, Stuart T.; VILLA, Raffaella; SIMPSON, Edmon W.; FERNÁNDEZ, Oliver; BAJÓN-FERNÁNDEZ, Yadira. Dry anaerobic digestion of organic waste: a review of operational parameters and their impact on process performance. **Bioresource Technology**, v. 299, p. 122681, mar. 2020.

Rico, C., Montes, J. A., & Lobo, A. Dry batch anaerobic digestion of food waste in a box-type reactor system: Inoculum preparation and reactor performance. **Journal of Cleaner Production**, 251, 119751, 2020.

Ripley, L.E; Boyle, W.C; Converse, J.C; Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. **Journal WPCF**, Alenxandria, v.38,n.35,p.406-411, 1986.

Sagar, N. A., Pareek, S., Sharma, S., Yahia, E. M., & Lobo, M. G. Fruit and Vegetable Waste: Bioactive Compounds, Their Extraction, and Possible Utilization. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 17(3), 512–531, 2018.

Scano, E. A., Asquer, C., Pistis, A., Ortú, L., Demontis, V., & Cocco, D. Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. **Energy Conversion and Management**, 77, 22–30, 2014.

Schievano, A., Tenca, A., Scaglia, B., Merlino, G., Rizzi, A., Daffonchio, D., Adani, F. Two-Stage vs Single-Stage Thermophilic Anaerobic Digestion: Comparison of Energy Production and Biodegradation Efficiencies. **Environmental Science & Technology**, 46(15), 2012.

Sharma, R., Oberoi, H. S., & Dhillon, G. S. Fruit and Vegetable Processing Waste. **Agro-Industrial Wastes as Feedstock for Enzyme Production**, 23–59, 2016.

SHEN, Fei; YUAN, Hairong; PANG, Yunzhi; CHEN, Shulin; ZHU, Baoning; ZOU, Dexun; LIU, Yanping; MA, Jingwei; YU, Liang; LI, Xiujin. Performances of anaerobic co-digestion of fruit & vegetable waste (FVW) and food waste (FW): single-phase vs. two-phase. **Bioresource Technology**, v. 144, p. 80-85, set. 2013.

SILVA JÚNIOR, Francisco das Chagas Gomes da; MENEZES, Camila Aparecida de; CAVALCANTE, Willame Araújo; ARAGÃO, Oscar Pedreira; ZAIAT, Marcelo; LEITÃO, Renato Carrhá. Characterization of Fruits and Vegetables Waste Generated at a Central Horticultural Wholesaler: a case study for energy production via biogas. **Industrial Biotechnology**, v. 18, n. 4, p. 235-239, 1 ago. 2022.

VAN, Dinh Pham; FUJIWARA, Takeshi; THO, Bach Leu; TOAN, Pham Phu Song; MINH, Giang Hoang. A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: configurations, operating parameters, and current trends. **Environmental Engineering Research**, v. 25, n. 1, p. 1-17, 11 mar. 2019.

Veluchamy, C., Gilroyed, B. H., & Kalamdhad, A. S. Process performance and biogas production optimizing of mesophilic plug flow anaerobic digestion of corn silage. **Fuel**, 253, 1097–1103, 2019.

Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. **Bioresource Technology**, 99(17), 7928–7940, 2008.

Wang, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G., & Han, X. Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. **Bioresource Technology**, 120, 78–83, 2012.

Wang, X., Li, Z., Bai, X., Zhou, X., Cheng, S., Gao, R., & Sun, J. Study on improving anaerobic co-digestion of cow manure and corn straw by fruit and vegetable waste: Methane production and microbial community in CSTR process. **Bioresource Technology**, 249, 290–297, 2018.

Wu, L.-J., Kobayashi, T., Li, Y.-Y., & Xu, K.-Q. Comparison of single-stage and temperature-phased two-stage anaerobic digestion of oily food waste. **Energy Conversion and Management**, 106, 1174–1182, 2015.

Xu, F., Li, Y., Ge, X., Yang, L., & Li, Y. Anaerobic digestion of food waste – Challenges and opportunities. **Bioresource Technology**, 247, 1047–1058, 2018.

Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, T. R., Kohli, S., & Rana, V. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review. **Bioresource Technology**, 95(1), 1–10, 2004.

Yirong, C., Zhang, W., Heaven, S., & Banks, C. J. Influence of ammonia in the anaerobic digestion of food waste. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 5(5), 5131–5142, 2017.

Yu, H.-Q., & Fang, H. H. P.. Acidogenesis of dairy wastewater at various pH levels. **Water Science and Technology**, 45(10), 201–206, 2002.

Zayed, G., & Winter, J. Inhibition of methane production from whey by heavy metals - protective effect of sulfide. **Applied Microbiology and Biotechnology**, 53(6), 726–731, 2000.

Zhang, C., Su, H., & Tan, T.. Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid–liquid system. **Bioresource Technology**, 145, 10–16, 2013.

Zhang, W., Zhang, L., & Li, A. Anaerobic co-digestion of food waste with MSW incineration plant fresh leachate: process performance and synergistic effects. **Chemical Engineering Journal**, 259, 795–805, 2015.

Zhang, L., Lee, Y.-W., & Jahng, D. Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements. **Bioresource Technology**, 102(8), 5048–5059, 2011.