

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

GIULIA BUENO DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE REATOR ANAERÓBIO UTILIZANDO RESÍDUOS  
ALIMENTARES COMO SUBSTRATO

ARARAQUARA  
2023

GIULIA BUENO DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE REATOR ANAERÓBIO UTILIZANDO RESÍDUOS  
ALIMENTARES COMO SUBSTRATO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Química da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof. Dr<sup>a</sup> Lorena Oliveira Pires

ARARAQUARA  
2023

GIULIA BUENO DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE REATOR ANAERÓBIO UTILIZANDO  
RESÍDUOS ALIMENTARES COMO SUBSTRATO

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Universidade Estadual  
Paulista "Júlio de Mesquita Filho" como  
parte dos requisitos para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia  
Química.

Araraquara, 07 de julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

*Lorena Oliveira Pires*

Profª. Drª. Lorena Oliveira Pires  
Instituto de Química / Unesp Araraquara

*A. Sarti*

Prof. Dr. Arnaldo Sarti  
Instituto de Química / Unesp Araraquara

*Caroline Varella Rodrigues*

Drª. Caroline Varella Rodrigues  
Escola de Engenharia de São Carlos / USP

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família, pelo amor incondicional, apoio e encorajamento constantes. Vocês foram meu alicerce e fonte de inspiração para superar os desafios e alcançar esta conquista.

Aos meus professores e orientadora Prof. Dr<sup>a</sup> Lorena Oliveira Pires, pelo conhecimento transmitido, paciência e orientação ao longo desta trajetória acadêmica. Suas palavras e ensinamentos foram essenciais para o meu crescimento como estudante e profissional.

Àqueles que de alguma forma contribuíram para a minha jornada e que estiveram ao meu lado durante essa trajetória acadêmica, o meu mais profundo agradecimento.

Que este trabalho possa contribuir de alguma forma para a ciência, para a sociedade e para o meu próprio crescimento pessoal e profissional.

## RESUMO

Os resíduos sólidos são umas das grandes preocupações nos dias atuais, e o descarte indevido destes resíduos, com foco nos resíduos alimentares, tem aumentado significativamente nos últimos anos. Esse grande impacto no meio ambiente faz com que seja necessário desenvolver métodos de tratamentos desses resíduos, utilizando, por exemplo, biorreatores. Estes reatores biológicos, utilizam da digestão anaeróbia por bactérias, para degradação da matéria orgânica. Tendo isso em vista, o objetivo do presente trabalho foi analisar o desempenho de um reator anaeróbio operado em bateladas sequenciais alimentado com substrato sintético e resíduo alimentar. No início do trabalho, foi realizada a adaptação da biomassa anaeróbia ao substrato sintético e posteriormente, houve substituição deste substrato sintético pelo resíduo alimentar. Em ambos os casos, foram realizadas análises para estudo da avaliação do desempenho do reator anaeróbio para as diferentes condições, usando como parâmetros o pH, geração de alcalinidade e quantificação de ácidos voláteis do efluente e afluente. Ademais, também foram realizadas análises para quantificar a degradação de matéria orgânica nos reatores biológicos por meio de digestão anaeróbia em diferentes condições operacionais. A remoção de DQO teve média de 94,04% para alimentação com substrato sintético e 23,63% para alimentação contendo resíduo alimentar. Para análise de carboidratos, o resultado obtido nos ciclos com resíduos alimentares foi equivalente a 58,40%. Além disso, foram obtidos intervalos de valores de pH do afluente para substrato sintético e resíduo alimentar respectivamente 7,22 a 7,73 e 6,58 a 7,39, e para efluente, 6,57 a 7,1 e 5,05 a 5,84, comprovando o aumento de acidez com a alimentação contendo resíduo alimentar. Isso também foi observado nas análises de ácidos e alcalinidade, comprovando o aumento da geração de ácidos orgânicos e conseqüentemente aumento da geração de alcalinidade com a alimentação contendo resíduo alimentar.

**Palavras chave:** digestão anaeróbia, biogás, substrato sintético, resíduo alimentar

## ABSTRACT

Solid waste is one of the major concerns nowadays, and the improper disposal of this waste, with a focus on food waste, has increased significantly in recent years. This great impact on the environment makes it necessary to develop methods to treat these wastes, using, for example, bioreactors. These biological reactors use anaerobic digestion of bacteria for the degradation of organic matter. With this in mind, the objective of the present work was to analyze the performance of an anaerobic reactor operated in sequential batches fed with synthetic substrate and food waste. At the beginning of the work, the anaerobic biomass was adapted to the synthetic substrate and, later, this synthetic substrate was replaced by food waste. In both cases, analyzes were performed to evaluate the performance of the anaerobic reactor for the different conditions, using as parameters the pH, alkalinity generation and quantification of volatile acids in the effluent and affluent. Furthermore, analyzes were also performed to quantify the consumption of organic matter in biological reactors with anaerobic digestion under the different conditions studied. The COD removal averaged 94.04% for feed with synthetic substrate and 23.63% for feed containing food waste. For carbohydrate analysis, the result obtained in cycles with food waste was equivalent to 58.40%. Furthermore, pH value ranges of the effluent were obtained for synthetic substrate and food waste, respectively 7.22 to 7.73 and 6.58 to 7.39, and for affluent, 6.57 to 7.1 and 5.05 to 5.84, proving the increase of acidity with the feeding containing food waste. This was also observed in the acid and alkalinity analyses, proving the increased generation of organic acids and consequently increased generation of alkalinity with the feed containing food waste.

**Keywords:** anaerobic digestion, biogas, synthetic substrate, food waste

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Contêineres utilizado para armazenamento temporário de resíduos.....	12
Figura 2: Transporte interno realizado pelo coletador.....	12
Figura 3: Esquematização da classificação dos resíduos sólidos.....	14
Figura 4 - Esquematização da digestão anaeróbia.....	16
Figura 5: Leira de compostagem.....	17
Figura 6 - Esquematização do biodigestor de lagoa coberta (BLC).....	18
Figura 7 - Esquematização de um biodigestor em fase sólida.....	19
Figura 8 - Esquematização de funcionamento de um biodigestor tipo UASB.....	20
Figura 9 - Exemplos dos diferentes modos de agitação, sendo: a) agitação hidráulica, b) agitação pneumática e c) agitação mecânica.....	21
Figura 10 - Esquematização das etapas no reator anaeróbio.....	22
Figura 11- Formas de carbono inorgânico em diferentes faixas de pH.....	25
Figura 12 - Esquema representativo do reator anaeróbio utilizado.....	28
Figura 13 - Valores de alcalinidade para o afluente e efluente.....	32
Figura 14 - Valores de ácidos voláteis para o afluente e efluente.....	33
Figura 15 - Remoção de DQO por ciclo.....	34
Figura 16 - Remoção de carboidratos por ciclo.....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Vantagens e desvantagens de tratamento via reator anaeróbio.....	15
Tabela 2 - Operação do reator por ciclo.....	28
Tabela 3- Parâmetros de análise de sólidos no início da operação.....	30
Tabela 4- Parâmetros de análise de sólidos no final da operação.....	31
Tabela 6 - Dados de pH com resíduo sintético.....	31
Tabela 7 - Dados de pH com resíduo alimentar.....	31

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Resíduos Alimentares.....	10
1.1.1. Classificação dos resíduos alimentares.....	13
1.2. Digestão anaeróbia.....	14
1.3. Tratamento de resíduos alimentares.....	16
1.4. Biodigestores.....	18
1.5. Reator Operado em Bateladas Sequenciais (ASBR).....	22
1.6. Análises Físico-Químicas.....	23
1.6.1. Demanda Química de Oxigênio (DQO).....	23
1.6.2. Análise de Carboidratos.....	24
1.6.3. Determinação de ácidos voláteis, alcalinidade e pH.....	24
2. OBJETIVOS.....	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1. Inóculo.....	26
3.2. Análise de sólidos.....	26
3.3. Substrato Sintético.....	27
3.4. Resíduo Alimentar.....	27
3.5. Reator.....	27
3.5.1. Operação do reator.....	28
3.5.2. Análise de pH.....	28
3.5.3. Análise de Alcalinidade e Ácidos Voláteis.....	29
3.5.4. Determinação da DQO.....	29
3.5.5. Análise de Carboidratos.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1. Análise de sólidos.....	30
4.2. Análise de pH.....	31
4.3. Análise de Alcalinidade e Ácidos Voláteis.....	32
4.4. Determinação da DQO.....	33
4.5. Análise de Carboidratos.....	34
5. CONCLUSÕES.....	35
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

## 1. INTRODUÇÃO

Tendo em vista o crescimento populacional aliado ao incremento das atividades industriais nos dias atuais, inúmeras quantidades de resíduos são gerados e despejados sem nenhum tratamento no meio ambiente. Só no Brasil, a quantidade de resíduos sólidos gerados em 2019 foi igual a 79,1 milhões de toneladas, segundo dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. Além disso, quando se fala da quantidade total de lixo no país, são geradas em média 82 milhões de toneladas de lixo por ano, sendo que apenas 2% tem um destino adequado por meio da reciclagem, segundo o site Globo em 2022. A origem destes resíduos é diversa, e existem diferentes classificações, podendo ser provenientes de atividades industriais, urbanas ou alimentares, por exemplo (GLOBO, 2022).

Resíduos industriais são provenientes das atividades fabris. Eles podem ser reciclados ou reaproveitados, mas, quando não o são, são considerados os maiores responsáveis pela poluição no meio ambiente. Isso porque sua composição é mista e muitos deles podem ser perigosos, trazendo consequências negativas não só para o meio ambiente, como também para a saúde pública. Podendo ser cinzas, lodos sólidos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, borracha, metal, escórias, vidros e cerâmicas, os resíduos industriais acabam não tendo um destino adequado, e muitas vezes, comprometem demasiadamente os corpos d'água (TERA AMBIENTAL, 2021).

Os resíduos urbanos, por sua vez, são aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas e originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana (SINIR, 2022). Sua composição é bastante diversificada, uma vez que está diretamente relacionada a características, hábitos de consumo e de descarte da população de cada região. Além disso, podem ser classificados em: matéria orgânica (restos de comida), papel e papelão (caixas, embalagens, jornais e revistas), plástico (garrafas e embalagens), vidro (garrafas, copos, frascos), metais (latas) e outros, como roupas e eletrodomésticos, por exemplo (ECYCLE, 2022).

### 1.1. Resíduos Alimentares

Arelado aos resíduos sólidos urbanos, tem-se uma grande quantidade de resíduos alimentares gerados, não só nas residências, como também por restaurantes e outros comércios relacionados. Provenientes das atividades de pré-preparo, preparo e distribuição de alimentos, além de processos relacionados à limpeza regular das áreas da Unidade de Alimentação e Nutrição, os resíduos alimentares, quando não tratados de forma adequada, acabam gerando riscos de contaminação do meio (ECYCLE, 2022).

No Brasil, estima-se que mais de 30 milhões de toneladas de resíduos orgânicos são despejados no meio ambiente anualmente. Esta grande quantidade indica a relevância em estudar meios de tratamentos destes resíduos sólidos alimentares (FAO, 2018).

A origem destes resíduos é diversa, podendo ser de residências, bares, restaurantes, refeições servidas nas indústrias, no comércio e nos serviços e por conta disso é necessário saber identificar as maiores fontes geradoras desses resíduos para o destino e tratamento

correto. Conhecer sua composição também é importante para determinar qual a melhor forma de tratar determinado resíduo alimentar (ECYCLE, 2022).

Segundo o relatório sobre desperdício de alimentos produzido pela Embrapa com apoio da Fundação Getúlio Vargas (FGV), os principais alimentos descartados têm alto grau nutricional, contendo: carnes (42,5%), com destaque para a carne bovina; arroz, feijão e outros grãos (27,4%); e umidade de 60 a 80% (EMBRAPA, 2022).

Além disso, o relatório aponta que cada família brasileira descarta aproximadamente 128,8 kg de alimentos por ano, colocando o país entre os que mais desperdiçam comida no mundo. Estes resíduos alimentares são destinados, em sua maioria, aos aterros sanitários, e segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), merecem igual preocupação àquela dada aos materiais recicláveis, como plásticos, papéis e papelões (EMBRAPA, 2022).

Um problema deste descarte em aterros sanitários é a contribuição com a emissão de gases do efeito estufa, devido ao apodrecimento desta matéria orgânica. Cerca de 8% da emissão global desses gases é proveniente do desperdício de alimentos. Segundo o projeto Perda e Desperdício de Comida da FAO (Food and Agriculture Organization), a emissão de carbono dos alimentos desperdiçados é equivalente a 3,3 bilhões de toneladas de dióxido de carbono por ano (FAO, 2018).

Além disso, os resíduos alimentares são mecanismos de proliferação de microorganismos, como as bactérias, e responsáveis pela atração de vetores e pragas. Por conta desses fatores, são necessárias medidas de bom acondicionamento e tratamento desses resíduos. Seu acondicionamento deve ser feito em lixeiras de fácil higienização e transporte, além de ter capacidade suficiente para conter tais resíduos. A principal norma relacionada ao manejo e ao descarte desses resíduos é a Resolução ANVISA 216/04. Tal norma, especifica a forma de disposição dos recipientes dos estabelecimentos, os quais devem ser identificados e íntegros. Ainda, esses coletores para descarte devem contar com tampas acionadas sem contato manual, e serem estocados em ambientes fechados e isolados da área da preparação e armazenamento de alimentos, de modo a evitar a proliferação de microorganismos e vetores indesejados (IUSNATURA, 2022).

Figura 1: Contêineres utilizado para armazenamento temporário de resíduos



Fonte: NUNES, 2019

Figura 2: Transporte interno realizado pelo coletador



Fonte: NUNES, 2019

Já quando se trata de resíduos alimentares gerados mundialmente, a situação é muito semelhante à do Brasil. Segundo a BBC News, o chamado "Índice de Desperdício de Alimentos 2021" apresenta um número assustador: somente em 2019, cerca de 931 milhões de toneladas de alimentos foram desperdiçados. Isso sugere que 17% da produção total de alimentos do mundo foram para o lixo. Segundo dados da ONU, a maior parte deste desperdício mundial de alimentos vem das famílias, equivalente a 61%. O restante vem do setor de serviço de alimentos (26%) e de comércios, supermercados e pequenas lojas (13%) (PAÚL, 2021).

Pesquisadores indicam que os níveis de resíduos domésticos são semelhantes entre si, quando se trata de países de alta, média e baixa renda, com base em informações de desperdício de alimentos em 54 países. Um exemplo é a Nigéria, país onde mais alimentos são jogados fora, representando cerca de 189 kg per capita por ano, dado este similar à Ruanda, onde o valor chega a 164 kg per capita. A Holanda e a Bélgica, por outro lado, descartam cerca de 50 kg per capita por ano, enquanto os Estados Unidos descartam em torno de 59 kg. "O que sabemos agora é que, para os países de renda média, o desperdício de alimentos domésticos é substancial. E isso muda completamente o que antes pensávamos ser apenas um problema de países de alta renda", explica Tom Quested, analista da WRAP e um dos autores do relatório, à BBC News Mundo (PAÚL, 2021).

Quanto se trata dos países da América Latina, as informações não são tão acessíveis assim. Isso é um tanto quanto preocupante visto que dessa forma fica impossível quantificar e dimensionar corretamente o problema do desperdício e geração de resíduos alimentares nos países latino-americanos. Os únicos dados reunidos foram coletados em sete pontos geográficos da América Latina, incluindo Belize, Brasil, México e Colômbia, os quais desperdiçam respectivamente 53, 60, 94 e 70 kg de alimentos por pessoa anualmente. De acordo com estudo da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) publicado em outubro de 2019, o continente é responsável por 20% do volume global de alimentos que se perdem desde a colheita até chegar ao varejo (FAO, 2018).

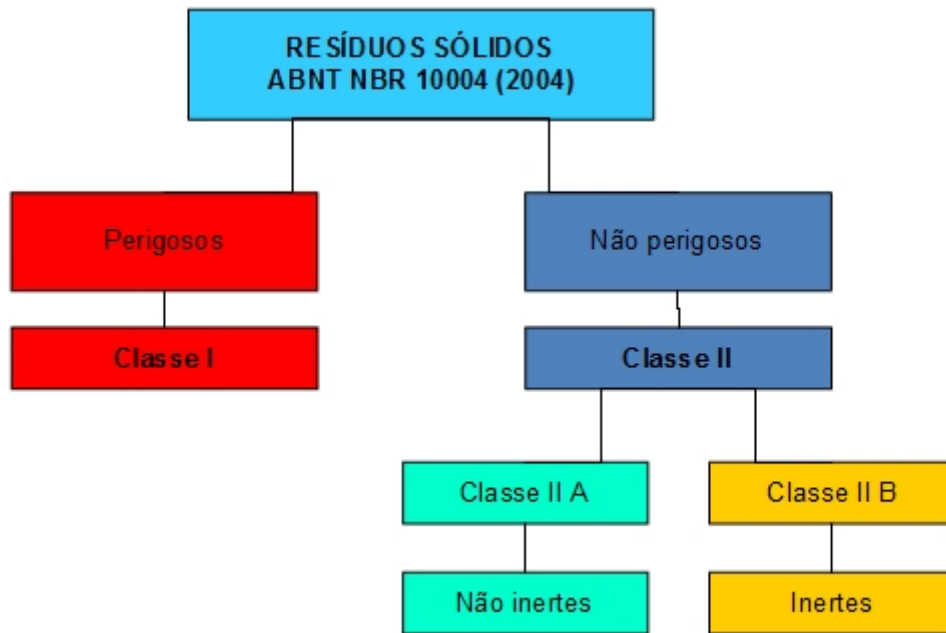
Segundo a BBC News: "a conclusão, então, é clara: isso não é mais um problema apenas para os países ricos, onde os consumidores simplesmente compram mais do que podem comer. Agora, é também daqueles que estão em desenvolvimento" (PAÚL, 2021).

#### 1.1.1. Classificação dos resíduos alimentares

Para o destino correto destes resíduos, tem-se como importância a sua caracterização e classificação. Segundo a norma técnica brasileira ABNT NBR 10.004/04, os resíduos sólidos são classificados de acordo com seus potenciais riscos à saúde pública e ao meio ambiente, para que desta forma, sejam gerenciados e tratados da melhor forma. Estes resíduos podem apresentar periculosidades em função de suas características químicas, físicas e biológicas (infecto-contagiosas) (PAÚL, 2021).

A NBR 10.004/04 classifica os resíduos em Classe 1 - Perigosos e Classe 2 - Não Perigosos. Os resíduos Classe 2 dividem-se em Classe 2A – Reativos e Classe 2B – Não Reativos e essa classificação tem como base a origem do resíduo e sua constituição química. Tendo isso em vista, a classificação dos resíduos sólidos alimentares se caracteriza como Classe 2 – Não Perigoso, de acordo com a Resolução CONAMA 006 de 15 de junho de 1988 (AMBIPAR, 2018).

Figura 3: Esquemática da classificação dos resíduos sólidos



Fonte: UFRGS

### 1.2. Digestão anaeróbia

Para descarte e tratamento dos resíduos alimentares, existem como alternativas a compostagem e a biodigestão, porém somente com sua devida separação na fonte, ou seja, separação destes resíduos alimentares dos outros tipos de resíduos (IUSNATURA, 2022). A compostagem é um método aeróbio de reciclagem e tratamento dos resíduos orgânicos que busca reproduzir algumas condições ideais observadas no processo natural de degradação da matéria orgânica, bem como garantir a segurança do processo (EMBRAPA, 2022). Por sua vez, a biodigestão, ao contrário da compostagem, é a decomposição destes resíduos de forma anaeróbia, ou seja, sem a presença de gás oxigênio. A biodigestão é um processo fermentativo, que tem como subprodutos o biogás e o biofertilizante, que podem ser aproveitados de alguma forma. Como o biofertilizante é muito rico em nutrientes, este pode ser usado na adubação de hortas e jardins, já o biogás, quando direcionado por meio de tubulação específica para um gerador, pode ser convertido em energia elétrica ou simplesmente usado como gás de cozinha (ECYCLE, 2022).

O funcionamento de biodigestores é relativamente simples. Também chamados reatores anaeróbios, estes equipamentos são reatores que utilizam do metabolismo de microrganismos para a degradação de matéria orgânica, oriunda de resíduos sólidos e alimentares, por exemplo, e suas pesquisas foram aprofundadas na década de 1970 com a necessidade de novas técnicas de tratamento de águas residuárias para a indústria alimentícia (PINTO, 2021). Na Tabela 1 é possível destacar as vantagens e desvantagens do tratamento via reator anaeróbio, o qual vem crescendo cada vez mais como uma solução para tratamento de resíduos nos dias atuais (SPEECE, 1996).

Tabela 1- Vantagens e desvantagens de tratamento via reator anaeróbio

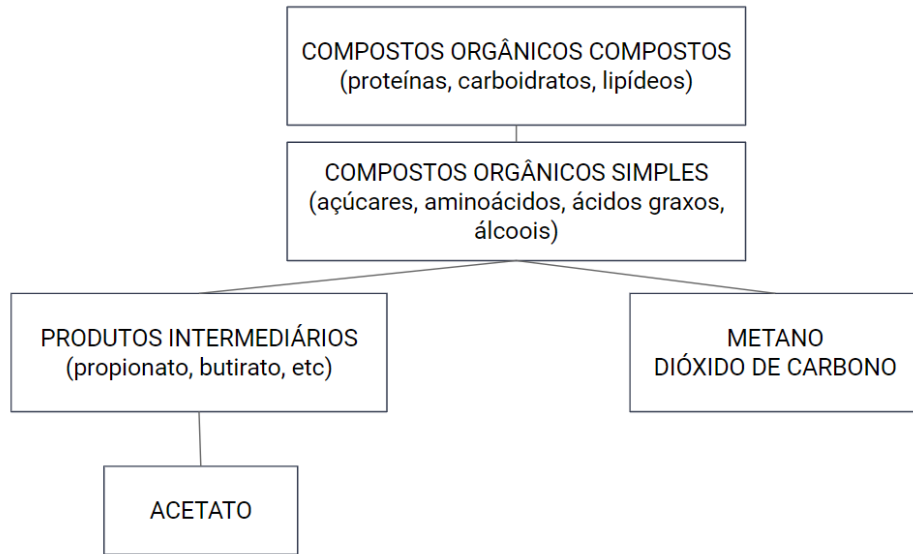
Vantagens	Desvantagens
Pode ser aplicado em pequena e grande escala com reduzido consumo de energia;	Microrganismos anaeróbios são susceptíveis à inibição por vários compostos;
Uso de pequena área para instalação;	Processos de pós-tratamento são necessários para atendimento de padrões de lançamento;
Produção de metano (uso: combustível);	Possibilidade de geração de odores desagradáveis;
Manutenção de biomassa viável, sem presença de substrato, por longo período (meses);	Desempenho de remoção insatisfatório de patógenos, fósforo e nitrogênio;
Baixa produção de lodo, cerca de 5 a 10 vezes menor com relação aos aeróbios;	Partida lenta pela ausência de lodo adaptado;
Tolerância a altas cargas orgânicas e baixos consumos de nutrientes.	Complexidade de bioquímica e microbiologia do processo anaeróbio.

Fonte: Adaptado de SPEECE, 1996

Em um reator anaeróbio, ocorre a digestão anaeróbia, a qual consiste na degradação de matéria orgânica pelos microrganismos na ausência de gás oxigênio, ocasionando na produção de gases como metano, dióxido de carbono e pequenas quantidades de hidrogênio, nitrogênio e sulfeto de hidrogênio. A digestão anaeróbia da matéria orgânica envolve três etapas: hidrólise e fermentação, acetogênese e metanogênese, descritas no diagrama da Figura 4 (CETESB, 2021).

Na primeira etapa, há a hidrólise e fermentação das moléculas complexas da matéria orgânica, como proteína, carboidratos e lipídeos, em moléculas simples, como açúcares, aminoácidos, ácidos graxos e álcoois, por meio de bactérias hidrolíticas fermentativas. Em seguida, ocorre a acetogênese, conversão das moléculas simples em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono pelas bactérias acetogênicas sintróficas associadas às bactérias utilizadoras de hidrogênio. Por fim, ocorre a etapa de metanogênese, resultando na formação de gás metano e dióxido de carbono por meio das bactérias metanogênicas (CETESB, 2021).

Figura 4 - Esquemática da digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de CETESB, 2020

### 1.3. Tratamento de resíduos alimentares

Com a grande quantidade de geração de resíduos sólidos, com foco nos alimentares, tem-se a necessidade de explorar meios de tratar estes resíduos. Uma das formas mais fáceis de descarte é o destino em aterros sanitários, como abordado anteriormente. Contudo, esta é uma prática que gera impactos negativos no meio ambiente, devido à alta produção de gases geradores de efeito estufa, bem como chorume devido a sua decomposição (ECYCLE, 2022).

Uma prática alternativa e muito mais sustentável é a compostagem, processo de decomposição biológica da matéria orgânica sob condições controladas de aerobiose, umidade e temperatura, gerando assim um produto estável, o qual é denominado como adubo orgânico ou composto orgânico. No entanto, nem todos os resíduos orgânicos podem ser destinados à compostagem, pois não sofrem esta degradação controlada, como a madeira tratada, borracha e couro (DE BERTOLDI; VALLINI; PERA, 1983).

A composteira é, basicamente, um recipiente de decomposição, onde são colocados os resíduos orgânicos, cobrindo-os com folhas secas e serragem para evitar o mau cheiro. É necessário sempre estar umedecendo o substrato terra + matéria orgânica, para desta forma acelerar o processo de decomposição. Além disso, faz-se necessário aerar a mistura, revirando o material de forma periódica, para este processo ocorrer de forma mais rápida. Outra alternativa para a compostagem, é o uso de minhocas, com a mesma aplicação de uma composteira comum, mas sem necessidade de revirar a matéria orgânica visto que as minhocas exercem o trabalho de aerar o meio (DE BERTOLDI; VALLINI; PERA, 1983).

Figura 5: Leira de compostagem



Fonte: UFSM, 2020

Para incentivo destas práticas sustentáveis e tratamento de resíduos sólidos no Brasil, tem-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, Lei 12.305/2010) a qual tem o objetivo de estimular mudanças consideráveis na forma de gerenciar estes resíduos no país. Os maiores desafios da PNRS é estipular o destino dos resíduos sólidos, tornando-se obrigatório o envio para reciclagem e compostagem. Por sua vez, os aterros sanitários passaram a ser considerados formas legais para disposição final de rejeitos apenas, resíduos que depois de esgotadas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos viáveis não possuem outra possibilidade sem ser a disposição final (BRASIL, 2010b).

Como formas de estimular a compostagem, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, um dos instrumentos desta política, menciona a implantação de unidades de compostagem e o aproveitamento da capacidade já instalada de usinas de compostagem, tudo isso, claro, acompanhado de uma coleta seletiva destes resíduos orgânicos. Além disso, o PNRS aborda algumas estratégias descentralizadas e locais para promover o incentivo ao tratamento domiciliar via compostagem, por meio de minhocários e de composteiras. Também visa o incentivo aos grandes geradores para que destinem áreas específicas em seus estabelecimentos para a prática da compostagem; além de sugerir a implantação de hortas escolares e utilização do composto na agricultura urbana (SIQUEIRA, 2015).

Contudo, mesmo com as diversas formas e possibilidades de compostagem, a Política Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo (PERS, Lei 12.300/2006), por exemplo, pouco discorre sobre a prática da compostagem e suas aplicações. Segundo SIQUEIRA, 2015 “políticas do governo federal e estadual buscam incentivar a regionalização da gestão de resíduos, retomando a ideia das grandes usinas de compostagem, as quais possuem histórico de falência no Brasil e em diversos países de baixa renda” (SIQUEIRA, 2015).

#### 1.4. Biodigestores

Biodigestores são caracterizados por equipamentos usados para o processamento de matéria orgânica, através da biodigestão. Eles podem ser segmentados de acordo com sua alimentação (batelada ou contínuo), forma de alimentação (ascendente ou descendente), concentração de sólidos no reator (digestão sólida >20%, semissólida 10% a 15% e úmida <10%) e sistema de agitação (mistura completa, parcial ou sem mistura). As diferentes classificações destes biodigestores promovem um tratamento de resíduos sólidos orgânicos de uma maneira otimizada de acordo com as características do substrato (EMBRAPA, 2022).

##### **Biodigestor de lagoa coberta (BLC)**

Com uma geometria de base retangular de seção trapezoidal e com inclinação variável de acordo com as características do solo onde está submetido, o biodigestor de lagoa coberta é uma das alternativas de biodigestores para gerenciamento de efluentes. Ele se caracteriza por ser um tanque escavado no solo, impermeabilizado e coberto com material geossintético (PVC, PEAD, etc.) caracterizado pela baixa permeabilidade a fluidos e gases, e suficientemente flexível para acumular biogás. A Figura 6 é uma esquematização do BLC (EMBRAPA, 2022).

Figura 6 - Esquematização do biodigestor de lagoa coberta (BLC)



Fonte: EMBRAPA, 2022

Segundo relatório da Embrapa, este biodigestor tem sido amplamente empregado no meio rural para o tratamento dos efluentes da produção animal, seu funcionamento e construção são bem simples, e por isso é considerado um biodigestor de baixo nível tecnológico. De uma forma geral, não possuem sistema de agitação nem de aquecimento, e possuem a necessidade de elevado tempo de detenção hidráulica (TDH), o que aumenta o requisito de área para instalação. O BLC também pode ser encontrado como modelo “canadense” ou “biodigestor de lona” (EMBRAPA, 2022).

A falta do sistema de aquecimento implica na variação da temperatura da biomassa do BLC em função da temperatura ambiente, ou seja, isto tem implicações diretas na capacidade de geração de biogás a qual pode ser muito afetada de acordo com a região em que se encontra. Além disso, nesse tipo de biodigestor, pode haver uma tendência de acúmulo de lodo no fundo do tanque, criando-se a necessidade de um sistema de descarte, isso devido ao

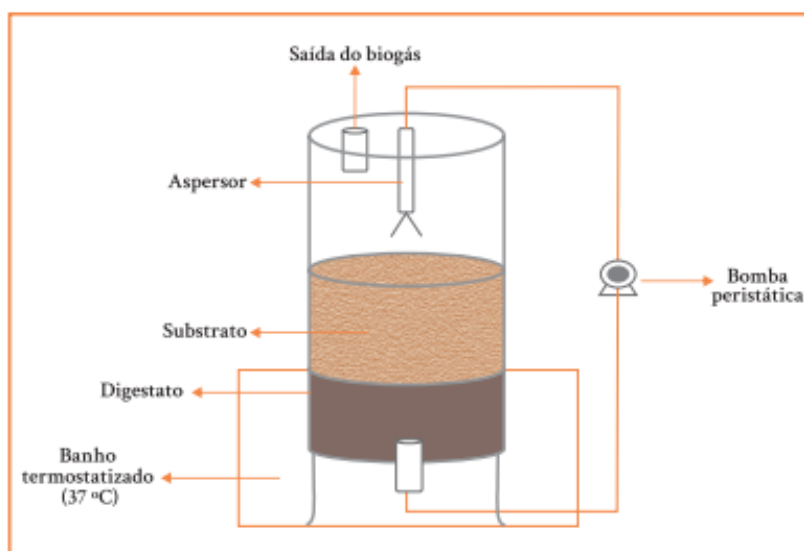
regime hidráulico do reator, e geralmente pela não utilização de um sistema de remoção de sólidos. Contudo, este descarte muitas vezes é dificultado pelo desenho do biodigestor, impedindo um descarte eficiente de sólidos (EMBRAPA, 2022).

Por conta destas limitações, o modelo BLC é geralmente utilizado para o tratamento de efluentes com baixa concentração de sólidos (até cerca de 3% m/v) além de baixa carga orgânica volumétrica (COV). Nesta situação, a produtividade de biogás varia de acordo com tipo de substrato, COV, temperatura de operação e TRH (EMBRAPA, 2022)..

### **Biodigestor em fase sólida (dry digestion)**

Os biodigestores em fase sólida são mais comuns com operação em batelada e como o próprio nome sugere, trabalham com resíduos sólidos (concentração entre 20% e 40%). O substrato é adicionado ao reator juntamente com um inóculo ( $50\% m_{\text{substrato}}/m_{\text{inóculo}}$ ), sendo o líquido percolado recirculado sobre a fração sólida, como esquematiza a Figura 7 (EMBRAPA, 2022)..

Figura 7 - Esquematização de um biodigestor em fase sólida



Fonte: EMBRAPA, 2022

Nos reatores em fase sólida, o tempo de digestão é entre 2 a 4 semanas, dependendo do tipo de substrato, devido à quantidade de sólidos presente no processo de degradação. Além disso, isso também afeta o volume do reator, pois devido à baixa concentração de água, faz-se a necessidade de biodigestores de menor volume. Contudo, por mais que o tamanho do reator seja otimizado, tem-se a necessidade de inserir no sistema bombas para recirculação do líquido (EMBRAPA, 2022).

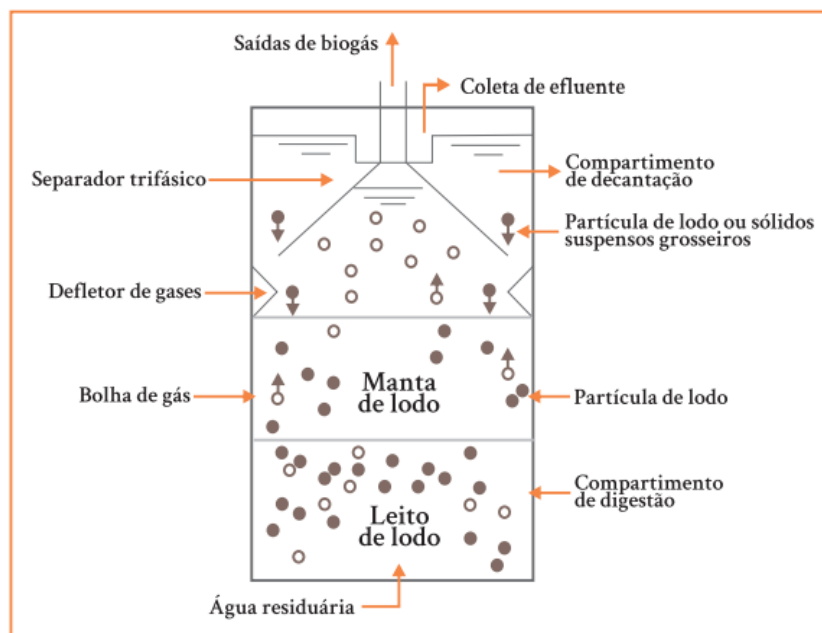
Segundo a Embrapa, a digestão em fase sólida apresenta como principais características: produtividade de biogás de 15% a 40% menor quando comparada com a via úmida (concentração de metano no biogás por via sólida é relativamente alta, sendo aproximadamente 80%); menor volume do biodigestor; capacidade de suportar substratos com maior concentração de sólidos, além de maior tamanho de partícula; não são necessárias

grandes diluições aos substratos; o biorreator precisa ser aberto para ser preenchido e/ou esvaziado; alimentação do biorreator descontínua (EMBRAPA, 2022)..

### Biodigestor tipo UASB

A sigla UASB é oriunda do inglês e tem o significado “*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*”, ou reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo. Este fluxo ascendente do afluente se dá por uma manta de lodo até o topo do reator, onde há um separador trifásico, como mostra a Figura 8 (EMBRAPA, 2022)..

Figura 8 - Esquematização de funcionamento de um biodigestor tipo UASB



Fonte: EMBRAPA, 2022

Esses reatores têm como característica a alta capacidade de retenção de biomassa, o que permite trabalhar com baixo tempo de detenção hidráulica (4 a 72 horas). Além disso, o reator UASB apresenta uma certa estabilidade em situações de variações das características dos afluentes, e suportam altas cargas orgânicas volumétricas, e que muitas vezes estas se encontram solubilizadas. Um ponto de limitação, é que por questões hidrodinâmicas, o afluente do reator UASB deve apresentar baixa concentração de sólidos totais (<2%) e por isso, dependendo do afluente, é necessário um pré-tratamento (EMBRAPA, 2022)..

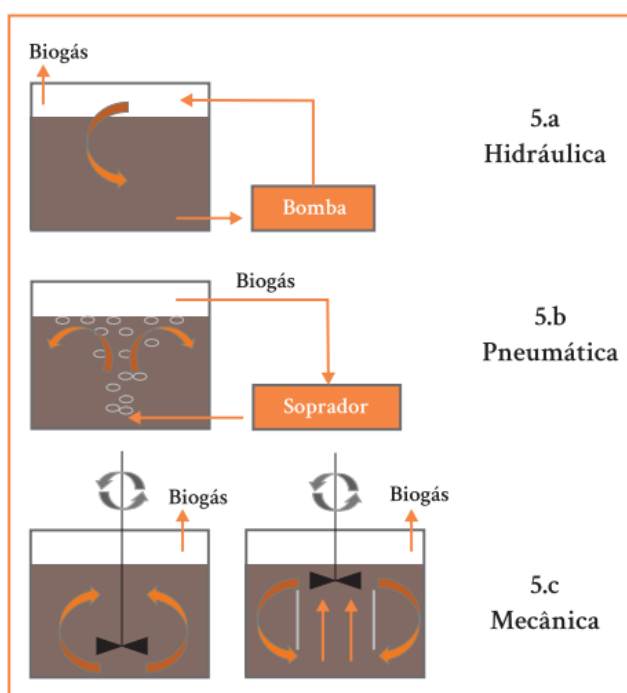
### Biodigestor CSTR

A sigla CSTR é proveniente do inglês “*Continuous Stirred Tank Reactor*” e significa reator com tanque agitado continuamente. Este modelo de biodigestor é caracterizado por ter seu conteúdo homogeneizado devido à presença de um sistema de agitação, e suporta elevadas cargas orgânicas volumétricas. Esta é a configuração de biodigestor mais utilizada em plantas de biogás, sobretudo quando se trata de codigestão (mistura de substratos) e com concentração de sólido mais elevada (próximo a 10% m/v) (EMBRAPA, 2022)..

Para reatores anaeróbios do tipo CSTR, o tempo de detenção hidráulica (TDH) e o tempo de retenção de sólidos (TRS) são iguais, pois parte-se do pressuposto que não há acúmulo de lodo no reator. O TDH mínimo do reator geralmente é entre 15 e 20 dias, podendo variar bastante em função do tipo de substrato a ser digerido (EMBRAPA, 2022).

Outra característica do reator CSTR é que a presença de um sistema de agitação acrescenta custos de implantação e manutenção, contudo auxilia na transferência de calor e mantém os sólidos em suspensão, visto que melhora o contato entre a matéria orgânica e os microrganismos (EMBRAPA, 2022)..

Figura 9 - Exemplos dos diferentes modos de agitação, sendo: a) agitação hidráulica, b) agitação pneumática e c) agitação mecânica



Fonte: EMBRAPA, 2022

Para a estabilidade do processo em um biodigestor CSTR, o bom funcionamento do sistema de agitação é fundamental. A utilização de sistema de agitação implica em um ganho de 15% a 30% na produtividade de biogás. Para isso, tem-se a importância da agitação adequada, garantindo um aumento na distribuição de substratos, nutrientes, enzimas e microrganismos no biodigestor. A agitação também colabora para eliminação/diminuição de crostas e otimiza a liberação do biogás presente no lodo e por isso, dois aspectos importantes: a intensidade e o tempo (EMBRAPA, 2022).

Somado ao processo de agitação em um reator CSTR, a manutenção da temperatura também faz-se importante, e pode ser feita através de sistemas de aquecimento, garantindo uma maior capacidade de produção de biogás devido à estabilidade do meio. Existem várias possibilidades para o aquecimento da biomassa em um biodigestor CSTR, alguns sistemas optam pelo aquecimento do substrato, outros pelo aquecimento direto da biomassa ou ainda a

circulação de água aquecida através de serpentinas na parte interna do reator (EMBRAPA, 2022)..

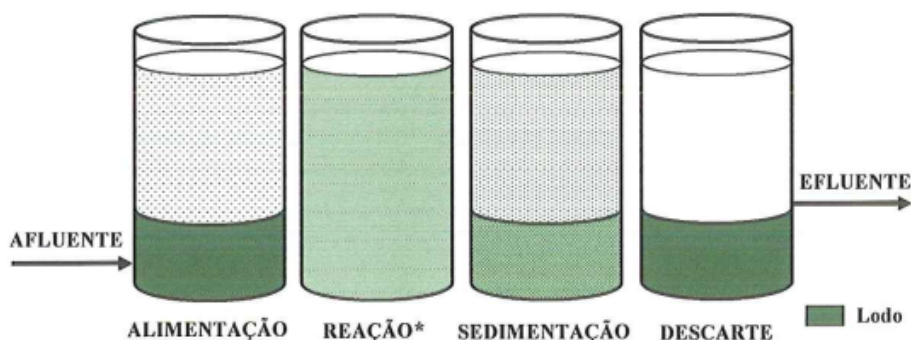
### 1.5. Reator Operado em Bateladas Sequenciais (ASBR)

Quando aplicado em tratamentos de resíduos, o funcionamento dos reatores anaeróbios pode ser de forma contínua ou em bateladas sequenciais. Se operado em bateladas sequenciais, o processo de degradação da matéria orgânica acaba contando com diversos benefícios, como a eliminação da sedimentação secundária, boa retenção de biomassa, operação simples e flexibilidade. Assim, os ciclos em batelada em reatores ASBR (*Anaerobic Sequencing Batch Reactor*) acabam sendo uma excelente alternativa aos ciclos sequenciais, possuindo como etapas: a alimentação, reação, sedimentação e descarte (DAGUE, 1992).

No processo de alimentação é onde há entrada do substrato no reator, podendo este ser feito através de uma bomba. Assim, é possível controlar não só o volume útil do reator, como também a concentração de substrato empregado. Posterior a ele, encontra-se a etapa de reação, na qual há o contato, por meio da agitação, entre o substrato e a biomassa, havendo conversão da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono. Nesta etapa, utiliza-se da agitação contínua ou intermitente e a duração da etapa de reação dependerá das velocidades de consumo de substratos primários e intermediários para a geração de gás metano, a qual é influenciada, segundo Angenent e Dague (1995) e Speece (1996) pela temperatura, concentração de substrato, composição (sólidos suspensos), concentração de biomassa contida no reator e a qualidade do efluente requerida (DAGUE, 1995; SPEECE, 1996).

Já na etapa de sedimentação, ocorre a separação da fase sólida, caracterizada pelo lodo, da fase líquida proveniente da alimentação. Ela é importante pois permite que não haja arraste do lodo no processo de descarte (fase seguinte e final do ciclo). Segundo Sung & Dague (1995) e Speece (1996), o tempo para a sedimentação completa é de, em média, 10 a 30 minutos. Por fim, tem-se a etapa de descarte, onde há a saída do líquido clarificado oriundo do processo de separação. Com o término desta fase, o ciclo tem continuidade com o início da fase de alimentação, caracterizando-se por um novo ciclo. A Figura 10 ilustra cada uma das etapas descritas (DAGUE, 1995; SPEECE, 1996).

Figura 10 - Esquematização das etapas no reator anaeróbio



\*Etapa com agitação: Recirculação de biogás, mecânica ou recirculação de líquido.

## 1.6. Análises Físico-Químicas

Para determinação e caracterização das amostras de entrada (afluente) e saída (efluente) do reator, a fim de compreender seu desempenho, tem-se diversas análises que podem ser feitas como: determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO), análise de carboidratos e determinação de ácidos voláteis, alcalinidade e pH (AQUINO, 2006).

### 1.6.1. Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A Demanda Química de Oxigênio é um parâmetro global que permite mensurar a quantidade de matéria orgânica em águas residuais. Existem legislações estaduais que estabelecem limites máximos e mínimos deste parâmetro para despejo de efluentes em corpos d'água, visto que não é tido como referência o parâmetro de DQO na resolução da CONAMA 357/05, que classifica os corpos d'água e estabelece tais condições de descarte destes efluentes no meio aquático. Para determinação da DQO de uma amostra de águas residuárias, existem dois métodos: titulométrico e colorimétrico (AQUINO, 2006).

A principal vantagem do método titulométrico é a possibilidade de utilização em amostras de elevada turbidez e cor residuais após a digestão com dicromato. Contudo, o método apresenta como desvantagens, o consumo e preparo de agente titulante e indicador, além de ser um método que depende da percepção visual da mudança de cor, a qual determina o término da titulação, sendo que cada analista pode ter uma percepção diferente desta “virada” (mudança de coloração) (AQUINO, 2006).

Em contrapartida, o método colorimétrico apresenta uma redução de resíduos quando comparado com o método titulométrico (cerca de 90%), segundo informações da revista TAE, especializada em tratamento de água e efluentes. Além disso, o gasto de água é muito menor no método colorimétrico, sendo praticamente zero quando comparado com o titulométrico, que gera em média 1 L/min. No entanto, existe uma grande restrição do método colorimétrico, visto que este somente pode ser empregado em amostras que não apresentam, turbidez ou cores muito intensas (AQUINO, 2006).

O método padrão para determinação da DQO prevê que alguns compostos orgânicos são oxidados por agentes químicos oxidantes fortes, como o dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$ ) em meio ácido, tendo como resultado final deste processo de oxidação a água e o dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Assim, causará DQO a amostra que contiver substâncias orgânicas e/ou inorgânicas passíveis de oxidação pelo dicromato de potássio em meio ácido. Segundo AQUINO (2006) quando se trata de esgotos tipicamente domésticos, a fração orgânica, em geral, supera a fração inorgânica reduzida, e a DQO pode ser utilizada, sem maiores problemas, para quantificar diretamente a matéria orgânica oxidável presente (AQUINO, 2006).

### 1.6.2. Análise de Carboidratos

Quando se trata da determinação da concentração de carboidratos de amostras do afluente e efluente de um reator anaeróbio, faz-se a relação de degradação da matéria orgânica pelas bactérias presentes. Isso porque, as bactérias não são capazes de assimilar a matéria orgânica particulada, e como primeira fase da degradação anaeróbia há a transformação dessa matéria orgânica particulada complexa (polímeros) em compostos menores, mais simples, e consequentemente mais solúveis, por meio de enzimas excretadas pelas bactérias. Tais compostos solúveis resultantes do processo de degradação anaeróbia são acessíveis às bactérias, sendo possível sua absorção (CHERNICHARO, 1997).

Dessa forma, é possível quantificar a matéria orgânica degradada através da análise de carboidratos. Para esta quantificação, é usado o método colorimétrico que consiste em determinar os carboidratos totais através da espectrofotometria UV, analisando amostras preparadas com fenol 5% e ácido sulfúrico concentrado. Segundo DUBOIS, et al., (1956), essa é uma técnica que é realizada de maneira simples e efetiva, visto que dispensa hidrólise da amostra através do uso de ácido sulfúrico concentrado, ocorrendo a desidratação das moléculas de carboidratos (DUBOIS, et al., 1956).

Esse método baseia-se no fato de que açúcares simples ou complexos, e seus derivados, incluindo metil ésteres com grupos redutores livres ou potencialmente livres, quando tratados com fenol e ácido sulfúrico concentrado, após sua respectiva desidratação pelo ácido sulfúrico e posterior complexação, apresentam coloração amarelo-alaranjado, com uma reação sensível e coloração estável (AFONSO, et al., 2017).

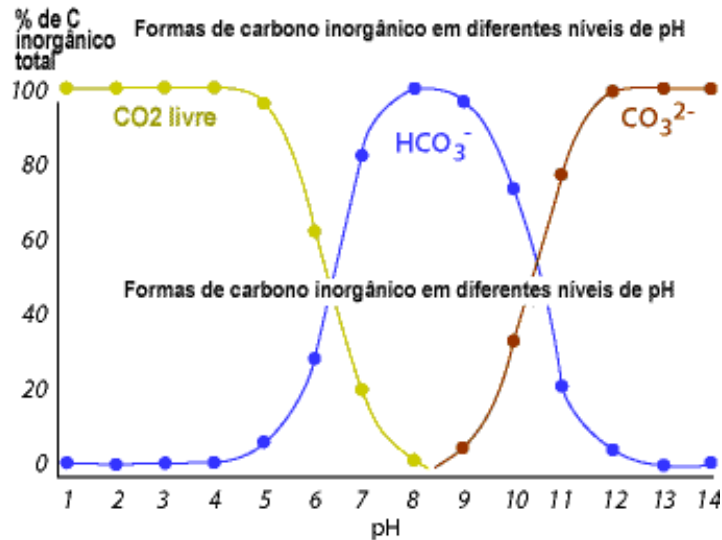
### 1.6.3. Determinação de ácidos voláteis, alcalinidade e pH

É fato a complexidade do processo de degradação anaeróbia, pois há a formação de diversos compostos metabólicos intermediários, os quais devem ser mantidos em equilíbrio dinâmico para evitar comprometimento do sistema (SPEECE, 1996). Quando a velocidade de produção de ácidos for maior que seu consumo, ocorre uma queda do valor de pH, inibindo as atividades das bactérias metanogênicas, acarretando na instabilidade do processo anaeróbio em questão. Por conta disso, é essencial monitorar tais sistemas anaeróbios, a partir da mensuração de pH, quantificação de ácidos voláteis e geração de alcalinidade, tendo em vista o afluente e efluente do reator (RIBAS, 2007).

No processo de digestão anaeróbia, com a geração de ácidos voláteis, há uma certa diminuição do pH do meio. Com isso, ocorre o aumento da alcalinidade, processo característico da digestão anaeróbia em condições normais. Nas condições normais de operação, o sistema possui alcalinidade capaz de neutralizar os ácidos formados e tamponar o pH, e esse aumento da alcalinidade ocorre por conta da amonificação e consumo de ácidos graxos do reator. Tendo isso em vista, a fim de evitar a acidificação do reator, é crucial o monitoramento destes parâmetros de alcalinidade e ácidos, pois existem certas bactérias que são inibidas em valores de pH mais baixos ( $< 4,5$ ) (RISSOLI, 2004).

Para cada faixa de valores de pH, são gerados compostos inorgânicos de carbono que são responsáveis pelo tamponamento do meio, como destaca a Figura 11 (UFRRJ, 2022).

Figura 11- Formas de carbono inorgânico em diferentes faixas de pH



Fonte: UFRRJ, 2022

Segundo OLIVEIRA (1997), é necessário o acompanhamento constante das condições do reator, para obter-se sucesso com o tratamento anaeróbio, identificando rapidamente as variações das condições padrão de operação. Um dos fatores a ser analisado, é a capacidade de geração de alcalinidade, ou tampão do sistema, e seu monitoramento acaba sendo mais eficaz do que o monitoramento apenas pelo pH, uma vez que, enquanto a escala pH é logarítmica, a de alcalinidade é linear. Dessa maneira, um pequeno abaixamento do pH implica em consumo de alcalinidade, e portanto implica em diminuição significativa da capacidade tampão. Por meio da digestão anaeróbia, o tamponamento se dá a partir do equilíbrio ácido carbônico / carbonato. A propriedade de tamponamento do pH, na degradação anaeróbia, vem naturalmente da produção do CO<sub>2</sub> e da liberação de íons carregados positivamente, da decomposição de proteínas e outros substratos, para formar alcalinidade de bicarbonato (RAMJEAWON, 2001). Dependendo dos valores de pH, as espécies de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) se encontram em equilíbrio. Para um reator anaeróbio com pH próximo a 7,0, a espécie preponderante é a do íon bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e por essa razão, utiliza-se o termo *alcalinidade de bicarbonato* (NASCIMENTO, 1996).

Com o propósito de tamponar o meio, a alcalinidade gerada deve ser suficiente para neutralizar os ácidos voláteis totais gerados, e o bicarbonato de sódio acaba sendo comumente usado para promover a alcalinidade no reator. Além de garantir um controle do pH, o sistema carbônico também age sobre a composição do biogás gerado, e está ligado a fenômenos associados à formação da incrustação e corrosão, com base na precipitação ou dissolução de CaCO<sub>3</sub> (NASCIMENTO, 1996).

## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho foi analisar o desempenho de um reator anaeróbio operado em bateladas sequenciais alimentado com substrato sintético e resíduo alimentar.

Para alcançar o objetivo principal, elencou-se os seguintes objetivos específicos:

1. Quantificar parâmetros como pH, geração de alcalinidade e de ácidos voláteis de amostras do efluente e afluente do reator a cada ciclo;
2. Quantificar o consumo de matéria orgânica no reator biológico nas diferentes condições empregadas.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1. Inóculo

O inóculo empregado foi proveniente de um reator anaeróbio em escala de bancada empregado em pesquisa sobre codigestão entre glicerol e vinhaça citrícola. O lodo em questão foi submetido à determinação da quantidade de sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (SV) e fixos (SF) de acordo com metodologia descrita em American Public Health Association, American Water Works Association e Water Environment Federation (APHA, 2005).

### 3.2. Análise de sólidos

A análise de sólidos totais, sólidos totais voláteis e sólidos fixos foi realizada no início e no final da pesquisa, para fins de comparação das características do lodo antes da inserção do substrato sintético e resíduo alimentar, com o lodo final. Por isso, foram coletadas amostras em duplicata no início e final da operação do reator.

Em ambos os casos, lavou-se duas cápsulas, C1 e C2 com água destilada, e na sequência ambas foram secas e calcinadas por cerca de uma hora a 550°C em um forno-mufla, com o objetivo de esterilizar e remover quaisquer impurezas que podem influenciar os resultados finais. Tais cápsulas foram resfriadas à temperatura ambiente em um dessecador, e em seguida pesadas em uma balança analítica para determinação do peso das cápsulas vazias (P1).

Depois da preparação das cápsulas/cadinhos para recebimento da amostra, foram colocados 50 mL de lodo em cada cápsula, e posterior a isso, estas foram levadas para uma estufa a 105°C para evaporação dos componentes voláteis. Cerca de 24 horas depois, as cápsulas foram retiradas da estufa, resfriadas à temperatura ambiente em dessecador, e pesadas novamente (P2).

Por fim, as cápsulas com resíduos de secagem foram levadas ao forno-mufla para etapa de calcinação, a 550°C por cerca de 30 minutos. Resfriadas à temperatura ambiente em

dessecador, estas foram pesadas obtendo-se P3. Para cálculo dos sólidos totais, fixos e voláteis, as equações do método em questão estão especificadas nas equações [1], [2] e [3]:

$$ST = \frac{(P2-P1)}{V0} \frac{mg}{mL} \quad [1]$$

$$SF = \frac{(P3-P1)}{V0} \frac{mg}{mL} \quad [2]$$

$$SV = ST - SF \frac{mg}{mL} \quad [3]$$

Sendo:

P1 = média do peso do cadinho vazio

P2 = média do peso do cadinho + lodo após secagem

P3 = média do peso do cadinho + lodo após calcinação

V0 = volume da amostra (lodo)

### 3.3. Substrato Sintético

Inicialmente, para adaptação da biomassa, o reator foi alimentado com substrato sintético, simulando esgoto sanitário. Sua composição era de 1,750 g de extrato de leveduras, 0,280 g de sacarose, 1,4 g de bicarbonato de sódio e 5 mL/L de uma solução de sais (50 g/L NaCl, 1,4 g/L MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O e 0,9 g/L CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O), diluídos em água. Esta solução era produzida logo antes de cada batelada, em balde plástico, à temperatura ambiente, usando água do sistema de abastecimento público.

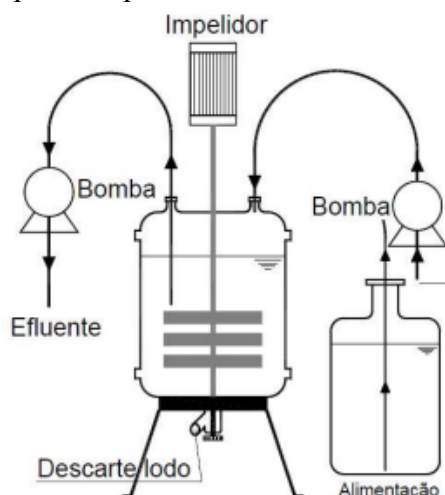
### 3.4. Resíduo Alimentar

Após a adaptação da biomassa no reator, o substrato sintético foi substituído pelo resíduo alimentar processado e diluído em água. O resíduo foi preparado através da mistura de diferentes restos de alimentos provenientes de restaurantes locais, de acordo com Braga, 2022, e armazenado em freezer até sua utilização.

### 3.5. Reator

Utilizou-se um reator de 8 litros, com volume útil de 5 litros (2 L de lodo e 3 L de substrato) construído em vidro borossilicato. Composto por bomba para descarga do efluente e alimentação do reator, além de um impelidor para agitação constante, o reator foi montado conforme o esquema apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Esquema representativo do reator anaeróbio utilizado



Fonte: DUARTE et al., 2015.

### 3.5.1. Operação do reator

O reator foi operado em bateladas sequenciais com ciclos de 48 horas pelos 18 primeiros ciclos e ciclos de 72 horas pelo período restante. Este foi alimentado pelo período de 12 ciclos com 3 L de substrato sintético simulando esgoto sanitário, com correção de pH para 7,0 com NaOH (0,05 M). Após a adaptação da biomassa, adotou-se uma alimentação com o resíduo alimentar processado e diluído (BRAGA, 2022). Neste cenário, foi utilizado primeiramente 250 mL do resíduo em 3 L de água e feita a correção do pH para 7,0 com NaOH. Após 3 ciclos, optou-se pela redução para 25 mL do resíduo alimentar no meio líquido, devido a não adaptação do reator à carga orgânica excessiva quando alimentado com 250 mL de resíduo.

Tabela 2 - Operação do reator por ciclo

Ciclo	Horas de operação (h)	Substrato	Quantidade de substrato
1 a 12	48	Sintético	3L
13 a 15	48	Resíduo alimentar	250mL / 3L água
16 a 18	48	Resíduo alimentar	25mL / 3L água
19 a 23	72	Resíduo alimentar	25mL / 3L água

Fonte: A autora, 2022

### 3.5.2. Análise de pH

Para determinação do desempenho do reator e caracterização das soluções de entrada e saída do reator, foram realizadas análises de pH para o afluente e efluente de cada ciclo. As

análises foram feitas utilizando um pHmetro de bancada, com base na metodologia de APHA (2005).

### 3.5.3. Análise de Alcalinidade e Ácidos Voláteis

A fim de quantificar a alcalinidade total e parcial, bem como ácidos voláteis gerados no reator, foi empregado o método de Ripley et al. (1986), nas amostras de afluente e efluente de cada ciclo do reator. A primeira parte do método consiste em titular a amostra de 50 mL com ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) (0,05 M) para quantificação das alcalinidades total e parcial. Titulou-se até o pH 5,75, obtendo V1. Em seguida, com a titulação até o pH 4,30, foi obtido V2, e por fim é titulou-se a amostra até o pH 3,00 para aquecimento em agitador magnético com o objetivo de quantificar os ácidos voláteis. Seguindo com a análise, após aquecimento da amostra de pH 3,00 em 200°C por 3 minutos após fervura, a amostra foi resfriada à temperatura ambiente e titulada com hidróxido de sódio (NaOH) (0,05 M) até pH 4,0. A partir do valor de pH 4,00, foi feita a última titulação até o pH 7,00, obtendo-se V3. Para cálculo dos valores de alcalinidade e ácidos voláteis, foram usadas as equações [4], [5] e [6]:

$$AP = \frac{V1 * M_{\text{ácido}} * 10^5}{V_{\text{amostra}}} \frac{mg \text{ CaCO}_3}{L} \quad [4]$$

$$AT = \frac{V2 * M_{\text{ácido}} * 10^5}{V_{\text{amostra}}} \frac{mg \text{ CaCO}_3}{L} \quad [5]$$

$$AV = \frac{V3 * M_{\text{base}} * 6.10^4}{V_{\text{amostra}}} \frac{mg \text{ HAc}}{L} \quad [6]$$

Sendo:

AP = alcalinidade parcial

AT = alcalinidade total

AV = ácidos voláteis

$M_{\text{ácido}}$  = molaridade do ácido

$M_{\text{base}}$  = molaridade da base

V1 = volume de ácido sulfúrico usado para titulação do pH inicial até o pH 5,75

V2 = volume de ácido sulfúrico usado para titulação do pH 5,75 até o pH 4,30

V3 = volume de hidróxido de sódio usado para titulação do pH 4,00 até o pH 7,00

### 3.5.4. Determinação da DQO

Para determinação da demanda química de oxigênio, foi necessário coletar 1,25 mL de amostra, concentrada ou diluída, colocando-a em um tubo de borossilicato com tampas

rosqueáveis. Foram acrescentados 0,75 mL de solução de dicromato de potássio, e vagarosamente, 1,75 mL de solução de sulfato de prata em ácido sulfúrico concentrado. A reação é exotérmica, e foi necessário um cuidado para o rosqueamento e agitação dos tubos. Posteriormente, os tubos foram levados a um digestor, previamente aquecido a 150 °C por 120 minutos para que a reação ocorresse. As amostras foram feitas em duplicata e para o branco foi utilizada água no lugar da amostra. Após o período de 2 horas, e resfriamento sob temperatura ambiente, foi realizada a leitura das amostras em um espectrofotômetro com comprimento de onda fixado em 620 nm. A realização das análises das amostras de afluente e efluente bem como da curva de calibração foi preparada de acordo com APHA (2005).

### 3.5.5. Análise de Carboidratos

A amostra foi previamente coletada, filtrada, pipetada, diluída (quando necessário) e homogeneizada, e sua análise foi realizada em triplicata. Foi colocado 0,5 mL da amostra em um tubo de ensaio com rosca, adicionando em seguida 0,5 mL de solução de fenol (5%) e 2,5 mL de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) P.A. A mistura foi agitada levemente, e foi necessário um tempo de reação de aproximadamente 10 minutos. Após a reação, os frascos foram submersos em banho maria à temperatura ambiente (25°C) por 15 minutos, e por fim, com as amostras resfriadas, foi feita a leitura em espectrofotômetro a 490 nm. A realização das análises das amostras de afluente e efluente bem como da curva de calibração foi preparada de acordo com Dubois (1956).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Análise de sólidos

- Análise no início da operação

Tabela 3- Parâmetros de análise de sólidos no início da operação

Parâmetros	Cadinho I	Cadinho II	Média
P1 (g)	90,78	96,47	
P2 (g)	91,18	96,79	
P3 (g)	90,86	96,54	
V0 (mL)	50,00	50,00	
ST (mg/mL)	8,11	6,40	7,25
SF (mg/mL)	1,68	1,41	1,55
SV (mg/mL)	6,42	4,99	5,71

- Análise no fim da operação

Tabela 4- Parâmetros de análise de sólidos no final da operação

Parâmetros	Cadinho I	Cadinho II	Média
P1 (g)	96,46	110,54	
P2 (g)	97,64	111,97	
P3 (g)	96,56	110,67	
V0 (mL)	50,00	50,00	
ST (mg/mL)	23,56	28,50	26,03
SF (mg/mL)	2,02	2,49	2,26
SV (mg/mL)	21,54	26,01	23,77

Comparando os valores apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5 é possível notar aumento na concentração de sólidos, principalmente sólidos voláteis, o que indica um aumento na quantidade de microrganismos presentes no reator durante a operação com resíduo alimentar.

#### 4.2. Análise de pH

O pH do meio foi medido usando o método potenciométrico, juntamente com os outros parâmetros, tanto no início quanto no final dos ensaios realizados.

Tabela 6 - Dados de pH com resíduo sintético

pH afluente	pH efluente
7,22 a 7,73	6,57 a 7,1

Fonte: A autora, 2022

Tabela 7 - Dados de pH com resíduo alimentar

pH afluente	pH efluente
6,58 a 7,39	5,05 a 5,84

Fonte: A autora, 2022

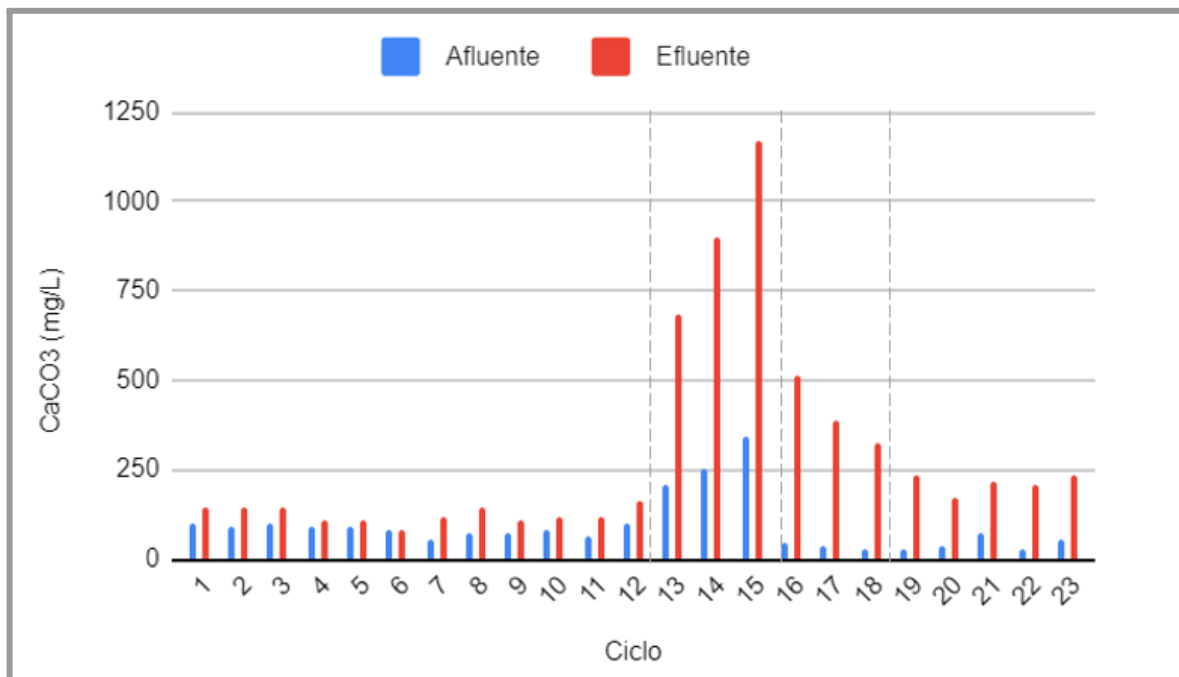
Após a introdução do resíduo alimentar no reator pode-se notar que seu efluente ficou mais ácido, indicando uma possível dificuldade dos microrganismos realizarem todas as etapas de digestão anaeróbia.

Ao analisar o substrato alimentado com resíduo alimentar, observa-se que ele possui uma acidez significativa, com um pH em torno de 5,4 após a digestão. De acordo com Braga (2022), o valor de pH para o substrato alimentado com resíduo alimentar pode variar em torno de 4,0, demonstrando a alta acidez do meio, assim como encontrado no presente trabalho. Ainda, segundo Lira Filho (2017), o valor do pH para o substrato alimentar utilizado foi em torno de 4,6 enquanto do inóculo foi de 8,77, demonstrando a acidificação do meio na presença destes resíduos. Os valores de pH variaram entre 5,5 e 8,5 no processo de digestão anaeróbia dos resíduos alimentares.

Ainda, em estudo realizado por Silva (2017), o pH do reator alimentado com resíduos alimentares se manteve próximo de 5,0 ao longo das 36 horas de fermentação, demonstrando grande semelhança com os valores obtidos no presente estudo.

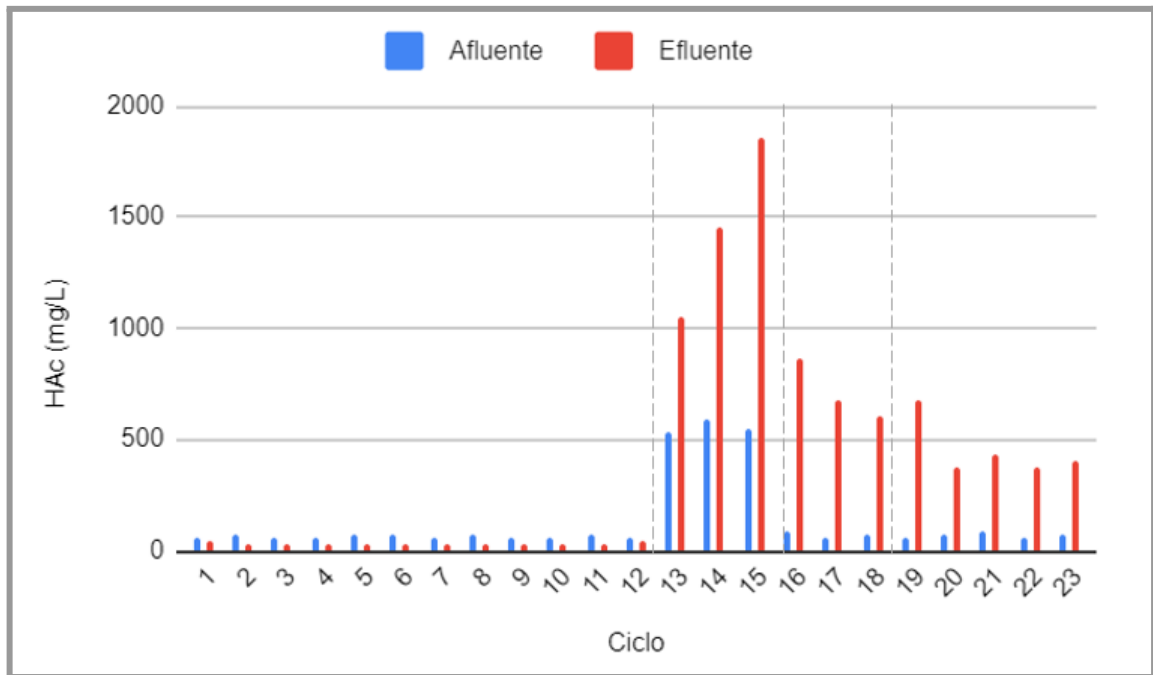
#### 4.3. Análise de Alcalinidade e Ácidos Voláteis

Figura 13 - Valores de alcalinidade para o afluente e efluente



Fonte: A autora, 2022

Figura 14 - Valores de ácidos voláteis para o afluente e efluente



Fonte: A autora, 2022

É possível notar que no ciclo 13 há um salto de concentração de alcalinidade e ácidos voláteis, por conta da inserção do resíduo alimentar no reator. Em compensação, mais ácidos são gerados, e conseqüentemente mais alcalinidade, a fim de tamponar o meio.

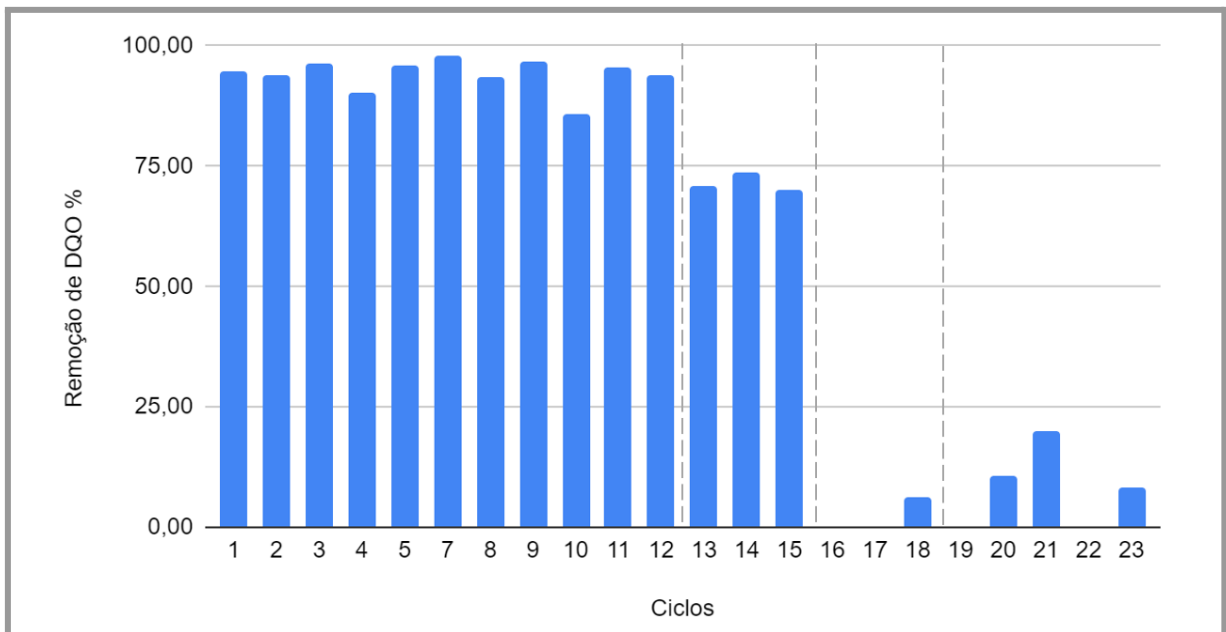
Segundo Braga (2022), para condições semelhantes de alimentação com resíduo alimentar diluído, houve um aumento no valor de alcalinidade total em cerca de 50%, enquanto de ácidos voláteis diminuiu em cerca de 33%.

No estudo de Lira Filho (2017) também fica perceptível o aumento considerável de alcalinidade durante a operação do reator anaeróbico de aproximadamente 4,5 para 6,2 g  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  no reator R1 e de 3,7 para 5,8 g  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  no reator R2.

#### 4.4. Determinação da DQO

A partir das médias obtidas para DQO nas amostras de afluente e efluente do reator, foi possível identificar a remoção de DQO para cada ciclo. Os resultados estão expressos visualmente no gráfico abaixo.

Figura 15 - Remoção de DQO por ciclo



Fonte: A autora, 2022

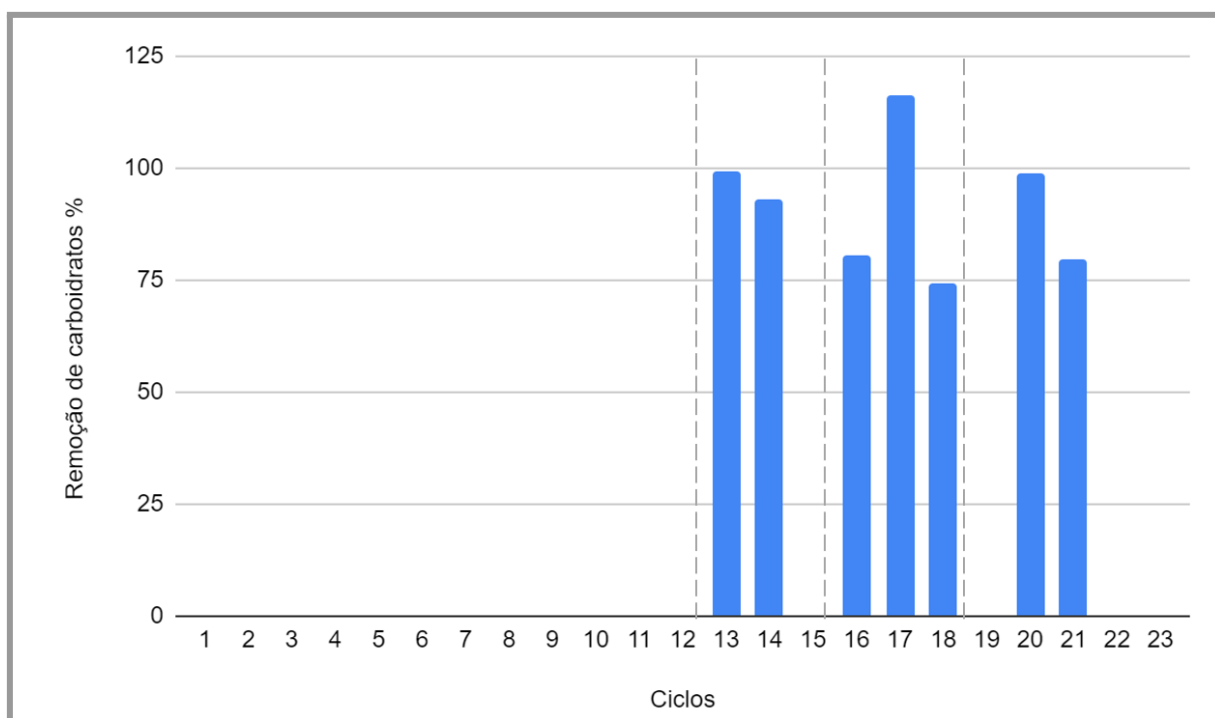
Nota-se uma diminuição do consumo de matéria orgânica no reator quando ele começou a ser alimentado com resíduo alimentar. Entretanto, vale destacar que o valor da DQO aumentou significativamente a partir do ciclo 13 quando comparada à DQO do substrato sintético. Valor médio de 296,9 mg/L no substrato sintético e 1490 mg/L no resíduo alimentar.

Nos estudos de Lira Filho, a partir do dia zero e até os dias 45 e 80 de operação, o reator mostrou a maior eficiência na remoção do substrato, com taxas de remoção de DQO próximas a 60,19% e 67,24% nos R1 e R2, respectivamente. Ainda, em um estudo sobre o tratamento de resíduos sólidos orgânicos em um biodigestor anaeróbio, Reis (2012) obteve valores médios de remoção de DQO em torno de 65%, com valores máximos alcançando 71%. Estes valores podem ser comparados aos valores obtidos nos ciclos 13, 14 e 15 com resíduo alimentar, em torno de 70% de remoção.

#### 4.5. Análise de Carboidratos

A partir do gráfico da porcentagem de remoção de glicose a cada ciclo de operação do reator, é possível observar valores elevados de consumo desse carboidrato durante o funcionamento do reator.

Figura 16 - Remoção de carboidratos por ciclo



Fonte: A autora, 2022

Ao comparar com o estudo realizado por Braga (2022), a porcentagem de remoção para substrato alimentado com resíduo alimentar se mostrou bem próximo, visto que os valores obtidos por ele foram de cerca de 92% de remoção. Já no estudo de Silva (2017), a taxa de remoção foi em torno de 20%, e essa diferença de valores pode estar relacionada às condições sob as quais o reator foi submetido.

## 5. CONCLUSÕES

O reator anaeróbio operado em bateladas sequenciais se mostrou promissor no tratamento de resíduos alimentares com manutenção da biomassa e remoção de carboidratos e matéria orgânica. Entretanto, estratégias de adaptação da biomassa e introdução do resíduo alimentar deve ser melhor estudada e explorada.

Pode-se observar que o pH do meio manteve-se próximo ao neutro quando o reator foi alimentado com substrato sintético. Entretanto, na presença de resíduo alimentar o efluente ficou mais ácido que o afluente. Os valores de ácidos mostram claramente esse aumento de concentração. Quanto à alcalinidade do meio, o reator mostrou-se apto a gerar alcalinidade porém de maneira muito mais acentuada quando alimentado com resíduo alimentar.

Ao tratar-se da demanda química de oxigênio (DQO), após a inserção do resíduo alimentar no reator, houve uma grande instabilidade do meio, comprovando a boa remoção

com a alimentação de substrato sintético, e uma baixa remoção com a alimentação de resíduos alimentares.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO, Marcela da Silva et al. **Obtenção da quantidade de carboidratos presentes no efluente de arroz parboilizado de um reator UASB**. In: 9º Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, 15º Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental e 3º Fórum Latino Americano de Engenharia e Sustentabilidade, 2017. Belo Horizonte: SBEA, 2017. p. 2-3. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/engineeringproceedings/xvенеeamb/085.pdf>. Acesso em: 02 out. 2022.

AGÊNCIA SENADO. **Aumento da produção de lixo no Brasil requer ação coordenada entre governos e cooperativas de catadores**. 2021. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/infomaterias/2021/06/aumento-da-producao-de-lixo-no-brasil-requer-acao-coordenada-entre-governos-e-cooperativas-de-catadores#:~:text=Segundo%20dados%20do%20Panorama%20dos,de%201%20kg%20por%20dia>. Acesso em: 02 out. 2022.

AMBIPAR GROUP. **Caracterização e Classificação de Resíduos Sólidos**. 2018. Disponível em: <https://www.verdeghaia.com.br/blog-caracterizacao-e-classificacao-dos-residuos-solidos/#:~:text=A%20classifica%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A9%20realizada%20de,que%20s%C3%A3o%20os%20res%C3%ADduos%20inertes>. Acesso em: 15 de jul. 2023.

ANGENENT L.T. & DAGUE R.R. (1995). **A Laboratory-Scale Comparison of the UASB and ASBR Processes**. In: 50th Purdue Ind. Waste Conference Proceedings, Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan, p. 365-377.

APHA AWWA WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21st ed. Washington, DC, USA, 2005.

AQUINO, Sérgio F. de, Silva, Silvana de Queiroz e Chernicharo, Carlos A. L. **Considerações práticas sobre o teste de demanda química de oxigênio (DQO) aplicado a análise de efluentes anaeróbios**. Engenharia Sanitária e Ambiental [online]. 2006, v. 11, n. 4. Acesso em 2022-10-09. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-41522006000400001>>.

BRAGA, ARTHUR. **Avaliação da produção de biogás em reatores anaeróbios alimentados com resíduos alimentares e glicerol bruto**. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. **Manual para Implantação de Compostagem e de Coleta Seletiva no Âmbito de Consórcios Públicos**. Brasília, 2010a. 69 p.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília: Câmara dos Deputados, n. 81, 2010b.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Versão pós audiências e consulta pública para conselhos nacionais.** Brasília, 2012. 102 p.

BUENO, Rodrigo. Revista TAE. **Comparação Entre O Método Colorimétrico E Titulométrico Na Determinação Da DQO.** 2011. Disponível em: <https://www.revistatae.com.br/Artigo/390/comparacao-entre-o-metodo-colorimetrico-e-titulo-metrico-na-determinacao-da-dqo#:~:text=O%20m%C3%A9todo%20colorim%C3%A9trico%20apresenta%20uma,praticamente%20zero%20no%20m%C3%A9todo%20colorim%C3%A9trico.> Acesso em: 05 out. 2022.

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Vol. 5– Reatores Anaeróbios.** Belo Horizonte: Segrac, 1997. 246 p.

DAGUE, R.R.; HABBEN, C.E.; PIDAPARTI, S.R. **Initial studies on the anaerobic sequencing batch reactor.** Water Science and Technology, Oxford, v.26, n.9-11, p.2.429-2.432, 1992.

DE BERTOLDI, M; VALLINI, G.; PERA, A. **The biology of composting: a review.** Waste Management and Resource, vol. 1, n. 2, p. 157-176, 1983

DUARTE, I.C.S, OLIVEIRA, L.L., OKADA, D.Y., PRADO, PF., VARESCHE, M.B.A. **Evaluation of the Microbial Diversity in Sequencing Batch Reactor Treating Linear Alkylbenzene Sulfonate under Denitrifying and Mesophilic Conditions Using Swine Sludge as Inoculum.** Brazilian Archives of Biology and Technology, 2015.

DUBOIS, M.; GILLES, K.A.; HAMILTON, J.K.; REBERS, P.A.; SMITH, F. **Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances.** Nature, v.28, n. 3, p.350 - 356, 1956.

ECYCLE. **Biodigestão.** Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/biodigestao/>. Acesso em: 06 out. 2022.

ECYCLE. **O que são Resíduos Sólidos Urbanos?** Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/residuos-solidos/#Producao-de-Residuos-Solidos-Urbanos-no-Brasil>. Acesso em: 06 out. 2022.

EMBRAPA. **Compostagem.** 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/hortalica-nao-e-so-salada/secoes/compostagem>. Acesso em: 03 out. 2022.

EMBRAPA. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato,** 2ª edição, 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO, 2018). **The state of food security and nutrition in the world.** Disponível em <http://www.fao.org/3/I9553ES/i9553es.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2023.

GLOBO. **Após 12 anos de espera, Brasil passa a ter plano para tratamento de resíduos sólidos.** 2022. Disponível em:

<https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2022/04/14/apos-12-anos-de-espera-brasil-passa-a-ter-plano-para-tratamento-de-residuos-solidos.ghtml>. Acesso em: 07 out. 2022.

HOSPITAL UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS. **Plano de gerenciamento de resíduos de serviço de saúde**. Dourados, 2021.

Disponível em:

<https://www.gov.br/ebserh/pt-br/hospitais-universitarios/regiao-centro-oeste/hu-ufgd/aceso-a-informacao/boletim-de-servico/2021/anexo-resolucao-23-plano-de-gerenciamento-de-residuos-de-servicos-de-saude.pdf>. Acesso em: 15 maio de 2023.

IUSNATURA. **Resíduos alimentares | Como descartá-los corretamente?** Disponível em: <https://iusnatura.com.br/residuos-alimentares-descarta-los-corretamente/>. Acesso em: 04 out 2022.

LIRA FILHO, Pedro de Sousa. **Produção de metano a partir de resíduos alimentares do Restaurante Universitário do Campus do Pici**. 2017. 64 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

MARCHI, C. M. D. F.; GONÇALVES, I. de O. **Compostagem: a importância da reutilização dos resíduos orgânicos para a sustentabilidade de uma instituição de ensino superior**. Revista Monografias Ambientais, [S. l.], v. 1, p. e1, 2020. DOI: 10.5902/2236130841718. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/41718>. Acesso em: 15 maio de 2023.

NASCIMENTO, R. A. **Desempenho de reator anaeróbio de manta de lodo utilizando efluentes líquidos de indústria alimentícia**. Campinas, 1996. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.

OLIVEIRA, R. A. **Efeitos da concentração de sólidos suspensos do afluente no desempenho e características do lodo de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo tratando águas residuárias de suinocultura**. São Carlos, 1997. 359f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Dpto. de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo.

PAÚL, Fernanda. **Os efeitos do desperdício chocante de alimentos no mundo**. 2021. Disponível em:

<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-56377418#:~:text=O%20chamado%20%22%C3%8Dndice%20de%20Desperd%C3%ADcio,mundo%20foram%20para%20o%20lixo.> Acesso em: 15 maio 2023.

PINTO, Claudio Plaza. **Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável**. 1999. 145p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/263329>. Acesso em: 31 de maio de 2021.

PORPINO, G.; Lourenço, C. E.; Araújo, C.M.; Bastos, A. **Intercâmbio Brasil – União Europeia sobre desperdício de alimentos. Relatório final de pesquisa. Brasília: Diálogos Setoriais União Europeia – Brasil**. 2018. Disponível em:

[http://www.sectordialogues.org/documentos/noticias/adjuntos/a39a4c\\_Relatorio\\_SemDesperdicio\\_Baixa.pdf](http://www.sectordialogues.org/documentos/noticias/adjuntos/a39a4c_Relatorio_SemDesperdicio_Baixa.pdf). Acesso em: 15 de maio de 2023.

RAMJEAWON, T. A. **Modeling approach for determining the alkalinity requirement for the treatment of weakly buffered carbohydrate industrial wastewaters by the UASB process.** In: WORLD CONGRESS ANAEROBIC DIGESTION, 9, 2001, Antuérpia. Proceedings... Antuérpia: Technological Institute, 2001. v.2, p.571-574.

REIS, Alexandro dos Santos. **TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS EM BIODIGESTOR ANAERÓBIO.** 2012. 79 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

REVISTA ESPACIOS. Venezuela: Grupo Editorial Espacios Gees, v. 37, 18 fev. 2016. Mensal. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a16v37n16/16371612.html>. Acesso em: 15 maio 2023

RIBAS, Maria Magdalena Ferreira, Moraes, Elizabeth de Mattos e Foresti, Eugenio. **Avaliação da acurácia de diversos métodos para determinação de ácidos graxos voláteis e alcalinidade a bicarbonato para monitoramento de reatores anaeróbios.** Engenharia Sanitária e Ambiental [online]. 2007, v. 12, n. 3 [Acessado 9 Outubro 2022] , pp. 240-246. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-41522007000300002>>. Epub 29 Out 2007. ISSN 1809-4457. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522007000300002>.

RIPPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. **Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes.** Journal Water Pollution Control Federation, Alexandria, v. 58, n. 5, p. 406-411, 1986.

RISSOLI, C.A. **Estudo de parâmetros operacionais do reator UASB tratando esgoto doméstico e avaliação da biodegradabilidade do seu efluente.** Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM -073/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 125p, 2004.

SÃO PAULO. CETESB. **Biogás: fundamentos.** Fundamentos. 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/biogas/fundamentos/>. Acesso em: 31 maio 2021.

SARTI, Arnaldo. **Desempenho de reatores anaeróbios operados em bateladas sequenciais em escala piloto no tratamento de esgoto sanitário.** 2004. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. doi:10.11606/T.18.2016.tde-29072016-110026. Acesso em: 2022-10-04.

SILVA, F.M.S. et al. **Hydrogen production through anaerobic co-digestion of food waste and crude glycerol at mesophilic conditions.** International Journal of Hydrogen Energy. UFRJ. Vol. 42, 2017.

SINIR. **Resíduos Sólidos Urbanos.** 2022. Disponível em: <https://www.sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-solidos-urbanos/>. Acesso em: 05 out. 2022.

SIQUEIRA, T. M. O. D., & ASSAD, M. L. R. C. L.. (2015). **Compostagem de resíduos sólidos urbanos no Estado de São Paulo (Brasil)**. *Ambiente & Sociedade*, 18 (Ambient. soc., 2015 18(4)), 243–264.

SUNG S. and DAGUE R.R. (1995). **Laboratory Studies pn the Anaerobic Sequencing Batch Reactor**. *Water Env. Research*, 67 (3), 294-301.

SPEECE, R.E. (1983) **Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater Treatment**, *Journal of Environmental Science Technology*, 17: 416-426

SPEECE, R.E (1996) **Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater Treatment**. Archae Press, U.S.A.

TERA AMBIENTAL. **O que é resíduo industrial e quais são suas classificações?** 2021. Disponível em:

<https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/o-que-e-residuo-industrial-e-quais-s-ao-suas-classificacoes>. Acesso em: 05 out. 2022.

UFRGS. **Reciclagem de Materiais Metálicos: resíduos sólidos. Resíduos Sólidos**.

Disponível em:

<https://www.ufrgs.br/napead/projetos/reciclagem-materiais-metalicos/pag2.php>. Acesso em: 15 maio de 2023.

UFRRJ. **Alcalinidade**. Disponível em: <http://www.ufrjr.br/institutos/it/de/acidentes/alc.htm>. Acesso em: 09 out de 2022.