

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL – *CAMPUS ERECHIM*
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

MARIANA DA CRUZ DE LIMA

ESTUDO DE REDUÇÃO DO VOLUME DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA INDÚSTRIA
ALIMENTÍCIA ATRAVÉS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

Erechim-RS

2025

MARIANA DA CRUZ DE LIMA

ESTUDO DE REDUÇÃO DO VOLUME DE RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS NO
TRATAMENTO DE EFLUENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso II,
do Curso Superior de Engenharia de Alimentos do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Rio Grande do Sul – *Campus* Erechim.

Orientador: Profa. Dra. Carina Faccio

Erechim-RS

2025

AGRADECIMENTOS

A todos que me apoiaram ao longo dos anos da graduação, especialmente a minha família e amigos que foram a base para que tudo fosse possível.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia *Campus* Erechim e aos professores, orientadores que não mediram esforços para contribuir com minha jornada.

A todos aqueles que fizeram parte desta jornada, direta ou indiretamente, o meu muito obrigada.

RESUMO

A geração de lodo é uma das principais consequências do tratamento de efluentes industriais, representando um desafio ambiental e econômico relevante, especialmente no setor de alimentos. A disposição inadequada desse resíduo pode acarretar sérios impactos ambientais, como a contaminação do solo e da água, além de elevados custos logísticos. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da digestão anaeróbia na redução do volume de lodo gerado em estação de tratamento de efluentes industriais, com e sem a aplicação de um modulador biológico comercial. Os experimentos foram realizados em escala laboratorial, utilizando frascos biorreatores contendo 10 g de lodo. Metade das amostras foi submetida apenas à digestão anaeróbia convencional, enquanto a outra metade recebeu também a aplicação do modulador. Após o período de incubação, as amostras foram secas em estufa e avaliadas quanto à redução de massa. Os resultados mostraram que a digestão anaeróbia convencional apresentou desempenho superior, com média de 64,11% de redução de massa, enquanto os biorreatores com modulador biológico apresentaram média de 60,91%. A avaliação econômica indicou que, mesmo com redução significativa de volume em ambos os casos, o uso do modulador representaria um custo adicional elevado, sem apresentar vantagem proporcional em termos de desempenho. Considera-se, no entanto, que a eficiência limitada do modulador pode estar associada à composição microbiológica do produto, que possivelmente não era compatível com as características do lodo utilizado. A presença de cepas não adaptadas pode ter restringido sua atuação no processo de degradação da matéria orgânica. Conclui-se que a digestão anaeróbia convencional, sem uso de modulador demonstrou ser tecnicamente eficaz como a com modulador, com a vantagem de ser economicamente viável, mas destaca-se a importância de estudos futuros com foco na seleção e adaptação de consórcios microbianos específicos ao tipo de resíduo tratado, visando à otimização do uso de moduladores biológicos em sistemas reais de tratamento.

Palavras-chave: Estação de tratamento de efluentes; Lodo; Digestão anaeróbica; Microrganismos; Biodegradação.

ABSTRACT

Sludge generation is one of the main consequences of industrial wastewater treatment, representing a significant environmental and economic challenge, especially in the food industry. Improper disposal of this waste can lead to serious environmental impacts, such as soil and water contamination, as well as high logistical costs. In this context, the present study aimed to evaluate the efficiency of anaerobic digestion in reducing the volume of sludge generated in an industrial wastewater treatment plant, with and without the application of a commercial biological modulator. The experiments were carried out on a laboratory scale using bioreactor flasks containing 10 g of sludge. Half of the samples underwent only conventional anaerobic digestion, while the other half also received the modulator. After the incubation period, the samples were dried in an oven and evaluated for mass reduction. The results showed that conventional anaerobic digestion performed better, with an average mass reduction of 64.11%, while the bioreactors treated with the biological modulator showed an average reduction of 60.91%. The economic assessment indicated that, although both treatments significantly reduced sludge volume, the use of the modulator would result in high additional costs without providing a proportional improvement in performance. It is considered, however, that the limited efficiency of the modulator may be related to the microbiological composition of the product, which was possibly not compatible with the characteristics of the sludge used. The presence of non-adapted microbial strains may have restricted their activity in the degradation process of organic matter. It is concluded that conventional anaerobic digestion, without the use of a modulator, proved to be as technically effective as the treatment with modulator, with the advantage of being economically feasible. Nevertheless, future studies focusing on the selection and adaptation of specific microbial consortia to the type of waste treated are essential to optimize the use of biological modulators in real treatment systems.

Keywords: Wastewater treatment plant; Sludge; Anaerobic digestion; Microorganisms; Biodegradation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas envolvidas no processo de digestão anaeróbica.	14
Figura 2 – Lodo adensado.	20
Figura 3 – Efluente bruto.	20
Figura 4 – Ensaio de biodegradação.	21
Figura 5 – Frascos de DBO de vidro de 300 mL.	22
Figura 6 – Estufa de incubação.	23
Figura 7 – Biorreatores incubados.	23
Figura 8 – Monitoramento da biodegradação.	24
Figura 9 – Amostra após período de incubação e secagem.	25
Figura 10 – Comparativo de oscilação de massa entre pares.	28
Figura 11 – Comparativo de sólidos totais entre os pares.	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVO	8
2.1	Objetivo Geral	8
2.2	Objetivo Específico	8
3	REFERENCIAL TEÓRICO	9
3.1	Resíduos sólidos na indústria de alimentos	9
3.1.1	Classificação dos resíduos	9
3.1.2	Destinação dos resíduos sólidos	10
3.2	Tratamento de efluentes líquidos	11
3.2.1	Tratamento físico-químico	11
3.2.2	Tratamento microbiológico	11
3.2.3	Produtos da estação de tratamento de efluentes	12
3.3	Biodegradação	13
3.3.1	Fases da digestão anaeróbia	13
3.3.2	Fatores da digestão anaeróbia	15
3.3.3	Inibição microbiana	17
3.4	Custos da disposição dos resíduos sólidos	17
4	MATERIAL E MÉTODOS	19
4.1	Materiais	19
4.2	Metodologia	19
4.2.1	Montagem dos biorreatores	21
4.2.2	Incubação	22
4.2.3	Monitoramento da biodegradação	23
4.2.4	Redução de massa	24
4.2.5	Avaliação econômica da aplicação	26
5	Resultados e discussões	27
5.1.1	Avaliação econômica parcial da aplicação	31
6	Conclusão	33
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

O tratamento e a disposição de resíduos sólidos gerados por estações de tratamento de efluentes (ETE) são temas centrais quando se discute sustentabilidade ambiental e melhoria da eficiência nos processos industriais. A forma como esses resíduos são manejados influencia diretamente não só na preservação ambiental, mas também nos custos operacionais das indústrias, na imagem institucional das empresas e no cumprimento de normas ambientais. A gestão responsável e eficaz de resíduos sólidos tem se mostrado um desafio crescente, especialmente frente ao aumento populacional, à urbanização acelerada e ao avanço do setor industrial brasileiro (Simioni, 2021).

Nos últimos anos, houve um aumento expressivo na quantidade de estudos voltados a encontrar alternativas viáveis para o destino desses resíduos. Esse movimento vem sendo impulsionado tanto pelo fortalecimento do conceito de economia circular quanto por pressões regulatórias, como é o caso da Resolução CONAMA nº 313, de 2002, que trata da elaboração do Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais (Brasil, 2002). Esse tipo de regulação exige das empresas não só o controle da geração de resíduos, mas também a busca ativa por soluções que minimizem os impactos ambientais da sua destinação.

Uma dessas alternativas, que vem ganhando força tanto em pesquisas acadêmicas quanto em aplicações práticas, é a biodegradação do lodo gerado em estações de tratamento de efluentes. Em especial, a digestão anaeróbia aparece como uma estratégia bastante promissora. De acordo com Santos, Freitas e Amorim (2024), essa tecnologia é capaz de transformar resíduos sólidos orgânicos – incluindo os considerados perigosos – em produtos com potencial de aproveitamento, como biogás e biofertilizantes. Além disso, a digestão anaeróbia apresenta vantagens como menor geração de lodo secundário, redução de odores e menor consumo energético em comparação a outras formas de tratamento.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo principal investigar uma forma de reduzir o volume de resíduos sólidos gerados por estações de tratamento de efluentes de uma indústria alimentícia, utilizando o processo de digestão anaeróbia com enfoque microbiológico. O estudo foi conduzido por meio da aplicação de um modulador biológico comercial, composto por microrganismos capazes de acelerar a degradação da matéria orgânica presente no lodo. A intenção foi avaliar a eficiência desse modulador biológico comercial na redução do volume de lodo gerado, verificando se essa tecnologia pode ser aplicada de forma prática e eficaz em estações de tratamento de efluentes.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Avaliar alternativas para reduzir o volume de resíduo sólido gerado no tratamento de efluentes de uma indústria de alimento do segmento de doces e balas.

2.2 Objetivo Específico

- Avaliar a redução quantitativa do lodo na biodegradação anaeróbia sem o uso do modulador biológico comercial.
- Aplicar um modulador biológico anaeróbio na biodegradação do lodo gerado nas estações de tratamento de efluentes.
- Avaliar estatisticamente a variação da massa dos experimentos com e sem o uso do modulador biológico comercial.
- Realizar um breve estudo acerca da viabilidade econômica da aplicação do modulador biológico e, conseqüentemente, a redução de gasto com a destinação do lodo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Resíduos sólidos na indústria de alimentos

A geração de resíduos sólidos é uma preocupação crescente em diversos setores industriais, e a indústria de alimentos não é uma exceção. Durante o processamento de alimentos, diversas operações, como limpeza, corte, embalagem e processamento de matérias-primas, geram resíduos sólidos que precisam ser gerenciados de forma adequada para minimizar os impactos ambientais e garantir a sustentabilidade do setor.

3.1.1 Classificação dos resíduos

Os resíduos sólidos gerados na indústria de alimentos podem ser classificados de diferentes formas, dependendo de sua origem e composição. De acordo com Kipper (2013), os resíduos sólidos podem ser classificados em:

- **Resíduos orgânicos:** São aqueles que apresentam alto teor de matéria orgânica, como cascas de frutas, restos de vegetais, borra de café e resíduos alimentares em geral. Esses resíduos podem ser degradados por processos biológicos, como compostagem e digestão anaeróbia, resultando na formação de fertilizantes ou biogás.
- **Resíduos inorgânicos:** Esses resíduos incluem embalagens de plástico, metal, vidro e outros materiais não biodegradáveis gerados durante as etapas de processamento e embalagem. Embora não possam ser biodegradados, muitos desses materiais podem ser reciclados.
- **Resíduos perigosos:** Em algumas operações, produtos químicos utilizados na limpeza e sanitização, assim como óleos e gorduras, podem ser classificados como resíduos perigosos. Esses resíduos precisam ser tratados adequadamente para evitar a contaminação do solo e da água.

Além disso, a NBR 10004-1 (2024) classifica os resíduos sólidos em classe I (perigosos) e classe II (não perigosos), com base em suas características físicas, químicas e biológicas (Kipper, 2013).

3.1.2 Destinação dos resíduos sólidos

O destino final dos resíduos sólidos na indústria de alimentos deve ser planejado de acordo com sua classificação, de modo a minimizar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade. Entre as principais formas de destinação, destacam-se:

- **Compostagem:** a compostagem é uma técnica amplamente utilizada para a destinação de resíduos orgânicos, especialmente em indústrias que produzem grandes quantidades de resíduos biodegradáveis, como cascas e restos de vegetais. Esse processo envolve a degradação biológica da matéria orgânica por microrganismos aeróbios, resultando em composto que pode ser utilizado como fertilizante agrícola (Madeira, 2009).
- **Reciclagem:** resíduos inorgânicos, como embalagens de plástico, papel, vidro e metais, são frequentemente direcionados para reciclagem. A reciclagem reduz a necessidade de extração de novas matérias-primas e minimiza a quantidade de resíduos dispostos em aterros (Haubert, 2015).
- **Incineração:** para resíduos que não podem ser reciclados ou compostados, a incineração é uma alternativa. Esse processo consiste na queima controlada de resíduos em instalações dedicadas que evitam a emissão de poluentes tóxicos. O processo ocorre por oxidação a alta temperatura entre 900°C a 1250°C (Baptista, 2021).
- **Aterros sanitários:** alguns resíduos, especialmente os inorgânicos que não podem ser reciclados, são enviados para aterros sanitários. Esses locais devem ser devidamente projetados e monitorados para evitar a contaminação do solo e das águas subterrâneas por meio de chorume ou gases gerados pela decomposição de resíduos orgânicos (Grasselli, 2015).
- **Digestão anaeróbia:** um método alternativo para a destinação de resíduos orgânicos é a digestão anaeróbia, que ocorre na ausência de oxigênio e gera biogás como subproduto. Esse biogás pode ser utilizado como fonte de energia, além de produzir biofertilizantes de alto valor agrícola (Haubert, 2015).

Cada uma dessas destinações deve ser considerada com base nas características dos resíduos gerados, no impacto ambiental e nas regulamentações vigentes. A implementação de práticas sustentáveis na gestão de resíduos sólidos pode contribuir significativamente para a redução dos impactos ambientais da indústria de alimentos.

3.2 Tratamento de efluentes líquidos

O tratamento de efluentes é uma etapa crucial nas indústrias de alimentos, pois visa à remoção de contaminantes presentes nos resíduos líquidos, garantindo que a água tratada possa ser devolvida ao meio ambiente com segurança ou até mesmo reutilizada em processos industriais. Existem diferentes técnicas para o tratamento de efluentes, que podem ser classificadas em tratamentos físico-químicos e microbiológicos (Kipper, 2013).

3.2.1 Tratamento físico-químico

O tratamento físico-químico de efluentes envolve processos que utilizam métodos físicos e reações químicas para remover sólidos suspensos, óleos, graxas, metais pesados e outros contaminantes. De acordo com Moraes e Bidone (2002), os métodos mais comuns incluem:

- **Sedimentação:** Um processo físico em que os sólidos suspensos são removidos pela ação da gravidade, depositando-se no fundo de tanques de sedimentação.
- **Flotação:** Uma técnica que usa bolhas de ar para fazer com que os sólidos flutuem à superfície, facilitando sua remoção.
- **Coagulação e Floculação:** Esses processos envolvem a adição de agentes químicos, como sais de alumínio ou ferro, que causam a aglomeração de partículas finas, facilitando sua remoção por sedimentação ou flotação.
- **Precipitação Química:** Um processo utilizado para remover metais pesados por meio da formação de compostos insolúveis que podem ser separados do efluente.

3.2.2 Tratamento microbiológico

O tratamento microbiológico de efluentes baseia-se na ação de microrganismos que degradam compostos orgânicos presentes nos efluentes. O tratamento pode ocorrer em sistemas aeróbicos ou anaeróbicos, dependendo do tipo de microrganismo utilizado e da presença ou ausência de oxigênio (Kipper, 2013).

- **Tratamento Aeróbio:** utiliza microrganismos que necessitam de oxigênio para degradar a matéria orgânica, transformando-a em dióxido de carbono, água e biomassa microbiana (Grasselli, 2015). Exemplos comuns incluem lodos ativados e lagoas aeradas.

- **Tratamento Anaeróbio:** nesse tipo de tratamento, os microrganismos decompõem a matéria orgânica na ausência de oxigênio, gerando biogás (composto principalmente de metano e dióxido de carbono) como subproduto. Esse método é frequentemente utilizado para tratar lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes (Kipper, 2013).

3.2.3 Produtos da estação de tratamento de efluentes

Durante o funcionamento de uma estação de tratamento de efluentes (ETE), principalmente em indústrias alimentícias, vários produtos são gerados ao longo das etapas do processo. O principal deles é que mais preocupa em termos de gestão é o lodo. Além dele, também podem ser produzidos o efluente líquido tratado, que pode ser reutilizado para a limpeza de calçadas e demais áreas externas ou descartado dentro dos padrões ambientais, e o biogás, nos casos em que se utiliza a digestão anaeróbia.

O lodo é um subproduto formado principalmente nas etapas de tratamento biológico, quando os microrganismos atuam na degradação da matéria orgânica presente no efluente. Ele é composto por células microbianas, matéria orgânica que não foi totalmente decomposta e alguns nutrientes, como fósforo e nitrogênio (Simioni, 2021). Por ser um resíduo com alta umidade e grande volume, o lodo exige cuidados específicos com armazenamento, transporte e destinação final, o que muitas vezes representa uma boa parte dos custos operacionais da estação (Gueri; Souza; Kuczman, 2018).

No caso da indústria alimentícia, a produção de lodo costuma ser ainda mais intensa devido à alta carga orgânica presente no efluente, formada por restos de alimentos, óleos, gorduras e proteínas (Avelino Neto; Lima, 2023). Justamente por isso, é importante buscar soluções que contribuam para reduzir o volume de lodo gerado.

Uma das alternativas que vem sendo estudada e aplicada é o uso de bactérias anaeróbicas que ajudam a decompor ainda mais a matéria orgânica presente no lodo. Microrganismos como *Clostridium spp.*, *Syntrophomonas spp.* e *Methanosaeta spp.* apresentam um bom desempenho nesse processo e podem ajudar a reduzir o volume final do resíduo (Simioni, 2021).

Além de ser uma forma de tratar melhor o lodo, o uso dessas bactérias também pode estar relacionado à produção de biogás e até ao aproveitamento do lodo como fertilizante, dependendo da sua composição e do tipo de tratamento que recebeu (Meneghel; Silva, 2023).

3.3 Biodegradação

A biodegradação é basicamente o processo onde os microrganismos transformam a matéria orgânica presente nos resíduos em compostos mais simples. Isso pode acontecer tanto com a presença de oxigênio (de forma aeróbica) quanto na ausência dele (anaeróbica), sendo um recurso bastante usado no tratamento de efluentes e resíduos sólidos, especialmente na indústria de alimentos, onde a carga orgânica costuma ser alta (Grasselli, 2015).

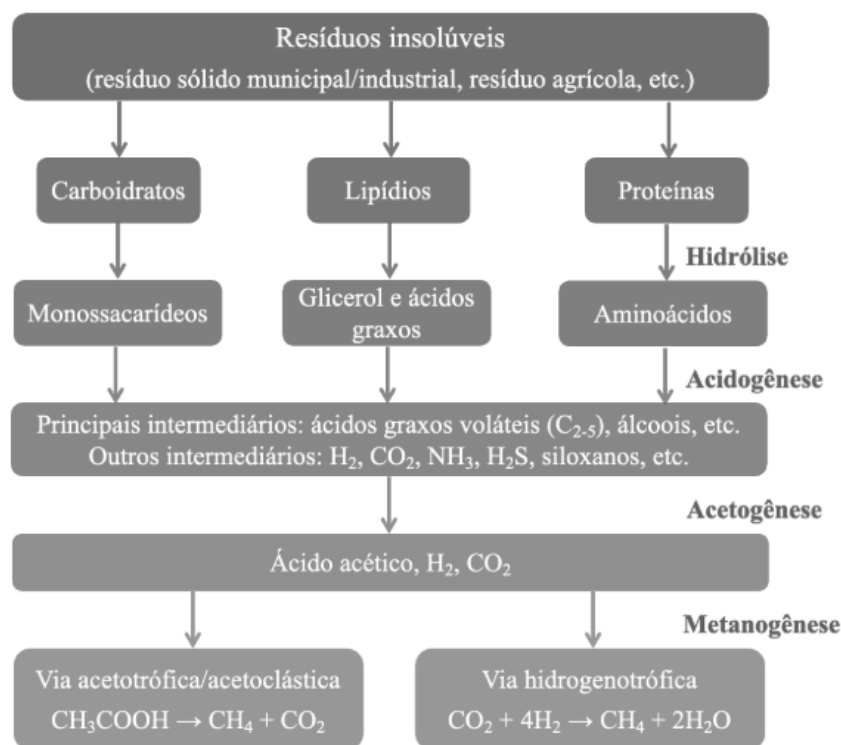
Nas estações de tratamento, esse processo biológico é uma das etapas mais importantes. Segundo Braille e Cavalcanti (1993), o objetivo é reduzir e estabilizar a carga orgânica através da ação de bactérias e outros microrganismos que transformam essa matéria em biomassa, gases e outros compostos mais simples. Para que isso funcione bem, é fundamental que as condições do sistema estejam ajustadas — como pH, temperatura, nutrientes e tempo de retenção — levando em conta as características do lodo e do efluente que estão sendo tratados.

Além disso, autores brasileiros como Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001) reforçam que, no tratamento biológico anaeróbio, a biodegradação traz algumas vantagens operacionais importantes. Entre elas, a menor geração de lodo residual e a possibilidade de estabilização do material orgânico com menor consumo energético. Essa abordagem, segundo os autores, é especialmente indicada para efluentes com alta carga orgânica, como os da indústria de alimentos, pois reduz o volume de lodo e facilita sua destinação final.

3.3.1 Fases da digestão anaeróbia

A digestão anaeróbica é um processo microbiológico utilizado para degradar resíduos orgânicos em ambientes sem oxigênio. A digestão anaeróbica “[...] tem a especificidade de não só transformar os resíduos, minimizando seu potencial poluidor, bem como gerar novos produtos de valor agregado, como biofertilizantes e biogás.” (Santos *et al.*, 2024). De forma resumida, pode-se observar na Figura 1 o processo de digestão anaeróbica.

Figura 1 - Etapas envolvidas no processo de digestão anaeróbica.



Fonte: JUNG *et al.*, 2021.

A hidrólise é a etapa onde macromoléculas, como proteínas e carboidratos, são decompostas em seus componentes menores, como aminoácidos e açúcares simples (Kipper, 2013). A hidrólise é uma fase crítica no processo industrial de digestão anaeróbica devido a sua duração. Deste modo, diversos trabalhos acadêmicos são voltados a reduzir o período de duração. Esta busca em reduzir o tempo se justifica porque a hidrólise de proteínas e lipídeos pode levar dias, enquanto que a hidrólise de carboidratos pode ocorrer em questão de horas (Gomes, 2022).

Em seguida os compostos resultantes da hidrólise são convertidos em ácidos graxos voláteis, álcool e gases, como dióxido de carbono e hidrogênio numa fase determinada como acidogênese (ou fermentação) (Kipper, 2013).

A terceira fase da digestão anaeróbia é a acetogênese. Nesta fase, os produtos da acidogênese são convertidos em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono através de uma reação endotérmica (Gomes, 2022).

Por fim, a metanogênese ocorre com a ação dos microrganismos metanogênicos convertendo o acetato e o hidrogênio em metano, o principal componente do biogás (Kipper, 2013). Conforme descrito por Simioni (2021) *apud* Seadi *et al.* (2008), 70% do metano formado

na reação microbiológica origina-se do acetato, e os 30% restantes são produzidos a partir da conversão de hidrogênio e dióxido de carbono.

3.3.2 Fatores da digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo complexo que depende de diversos fatores para que ocorra de forma eficiente. De acordo com Cremonez (2021), este processo depende das condições de pH, de temperatura para bactérias mesófilas de 20 a 45 °C, das características do substrato referente a carga orgânica e inorgânica presente e concentração de proteínas, lipídeos e carboidratos, do período de retenção hidráulica e o inóculo que deve condizer com as bactérias naturais do lodo.

3.3.2.1 Nutrientes importantes

O nitrogênio é um macronutriente essencial ao desenvolvimento de microrganismo visto que necessitam deste macronutriente para a síntese de proteínas (Meneghel; Silva, 2023). A concentração de nitrogênio bem como o índice de carbono-nitrogênio (C/N) afeta diretamente a digestão anaeróbia (Santos; Pires; Okada, 2024). Por este motivo, enriquecer o substrato orgânico com uma solução de nitrogênio pode ser uma alternativa para auxiliar a biodigestão.

Neste contexto, um ponto a manter-se atento é quanto à relação entre os nutrientes, pois o desbalanceamento da proporção pode gerar um efeito negativo na atividade microbiológica, e assim prejudicando a digestão anaeróbica (Neshat *et al.*, 2017).

Possíveis fontes naturais de nitrogênio para as células microbianas são o esterco de porco e os resíduos de indústrias de alimentos (Simioni, 2021). Outras fontes comerciais como amônia e nitrato (Brucha, 2007) são facilmente encontradas e empregadas nestes processos.

O fósforo, assim como o nitrogênio é crucial para o desenvolvimento das bactérias envolvidas no processo de digestão anaeróbia (Santos; Pires; Okada, 2024) e, para além, atua na captura e transferência de energia para as atividades celulares (Mirmohamadsadeghi *et al.*, 2019).

Embora não faça parte da estrutura celular, o potássio regula a pressão osmótica e ativa enzimas, influenciando positivamente o metabolismo energético dos microrganismos (Gueri *et al.*, 2017). Apesar de ser um importante agente no processo de digestão anaeróbica, em altas concentrações o potássio pode inibir o crescimento bacteriano (Simioni, 2021).

3.3.2.2 Moduladores microbiológicos comerciais

Os moduladores comerciais podem ser compostos de diferentes consórcios de bactérias e aplicados conforme as características da estação de tratamento, do efluente e do lodo presentes. O uso de consórcios microbianos comerciais tem ganhado espaço na indústria por facilitar a aplicação técnica e garantir uma composição microbiana estável e eficaz (Fan *et al.*, 2023). Dentre os diversos microrganismos anaeróbios utilizados, podem ser mencionados como exemplos:

O *Bacillus subtilis* é um microrganismo amplamente utilizado na engenharia ambiental por sua capacidade de produzir diversas enzimas hidrolíticas, como proteases, amilases e lipases, que atuam diretamente na degradação de proteínas, amidos e gorduras, componentes abundantes no lodo de origem alimentícia. Sua aplicação como agente de bioaumento tem demonstrado efeitos positivos na solubilização de sólidos e na conversão de matéria orgânica complexa em formas mais acessíveis para as etapas seguintes do processo anaeróbio (Li *et al.*, 2020).

O *Bacillus licheniformis*, por sua vez, destaca-se por sua habilidade de crescer em ambientes adversos e por sua elevada produção de enzimas termotolerantes, como celulasas e xilanases. Essas enzimas têm papel fundamental na quebra de componentes fibrosos e lignocelulósicos, o que amplia a eficiência do tratamento de resíduos com carga orgânica mais resistente, como restos vegetais e fibras presentes em resíduos da indústria alimentícia (Guo *et al.*, 2018).

Já o *Bacillus amyloliquefaciens* e o *Bacillus pumilus* têm sido explorados em estudos recentes pela sua atuação na hidrólise de polissacarídeos complexos e por produzirem substâncias antimicrobianas que inibem microrganismos competidores indesejáveis. Além disso, *B. pumilus* tem demonstrado potencial para melhorar a sedimentabilidade do lodo ativado, favorecendo a clarificação do efluente tratado (Menezes; Silva; Souza, 2022).

A levedura *Saccharomyces cerevisiae*, bastante conhecida por seu uso na indústria de alimentos e bebidas, também possui um papel importante no contexto do tratamento de efluentes. Em condições anaeróbias, essa levedura participa da acidogênese e contribui para a estabilização da biomassa, auxiliando na redução de compostos como proteínas e lipídios e contribuindo para o controle de odores durante o processo (Jain; Pradhan, 2021).

A interação entre essas cepas proporciona um consórcio microbiano sinérgico. Enquanto os bacilos atuam nas fases iniciais de hidrólise e acidogênese, liberando ácidos graxos voláteis, *S. cerevisiae* contribui para estabilizar o sistema e competir com microrganismos indesejáveis.

Essa atuação conjunta favorece a redução do volume de lodo gerado e melhora a eficiência global do processo de digestão anaeróbia. A utilização de moduladores como o modulador biológico mencionado representa uma alternativa biotecnológica promissora para a otimização de ETEs da indústria alimentícia, reduzindo tanto a carga orgânica quanto os custos operacionais associados ao manejo do lodo (Kraemer *et al.*, 2021).

3.3.3 Inibição microbiana

Os fatores previamente mencionados como importantes para que ocorra um processo de digestão anaeróbia eficiente, são os mesmos que podem causar inibição microbiana quando fora dos padrões caracterizados.

Conforme descrito por Cremonez (2021) altas concentrações de C/N *ratio* podem afetar negativamente o processo de digestão anaeróbia, uma vez que limita a renovação celular, enquanto que baixas concentrações implicam em uma quantidade elevada de amônia e, desta forma, criam um meio tóxico para os microrganismos de interesse.

Outro motivo de inibição microbiana, mencionado por Simioni (2021), é a alta pressão que pode ocorrer em biorreatores quando esta não é controlada.

Ainda, de acordo com Neshat (2015) o alto teor de ácidos graxos voláteis – produtos intermediários do processo de produção de gás metano – pode inibir o desempenho dos microrganismos, visto que, este desequilíbrio diminui o valor do pH a níveis inferiores de 6,0.

3.4 Custos da disposição dos resíduos sólidos

A gestão de resíduos sólidos envolve custos significativos, tanto em termos de coleta, transporte, tratamento e destinação final. A escolha do método de disposição, como incineração, aterros sanitários, ou digestão anaeróbia, impacta diretamente os custos operacionais. Segundo Piccin (2013), aterros industriais exigem grandes investimentos em infraestrutura e monitoramento, especialmente no caso de resíduos classificados como perigosos. Além disso, o processo de biodegradação pode reduzir os custos de disposição ao diminuir o volume de resíduos e gerar subprodutos como biogás, que pode ser aproveitado como fonte de energia (Santos; Freitas; Amorim, 2024).

O estudo de viabilidade financeira de um projeto é um processo essencial para avaliar a sustentabilidade e a rentabilidade de um investimento (Soldara, 2009). A partir dos valores de mercado do modulador biológico e do bioestimulador aplicados no estudo e das quantidades

que serão utilizadas, será realizado um cálculo estimando o custo necessário para reduzir 1 quilograma de lodo industrial.

A disposição dos resíduos sólidos, em especial do lodo gerado nas estações de tratamento de efluentes, representa uma das etapas mais onerosas no processo de tratamento. Depois que o lodo passa pelo processo de desaguamento e atinge uma consistência semissólida, ele precisa ser removido do sistema e transportado até uma unidade licenciada para disposição final. Esse transporte, geralmente feito por caçambas metálicas envolve custos com aluguel, logística, destinação e taxas ambientais. Além disso, empresas especializadas precisam estar devidamente licenciadas para atuar nesse tipo de serviço, o que também encarece o processo (Santos; Freitas; Amorim, 2024).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os produtos provenientes de estação de tratamento de efluentes como o lodo adensado e o efluente bruto foram fornecidos por uma empresa do ramo alimentício localizada em Erechim, RS, pertencente ao segmento de doces e balas. Foi utilizado um modulador biológico concentrado, voltado para a intensificação do processo de degradação da matéria orgânica em estações de tratamento de efluentes industriais, desenvolvido por uma empresa especializada em tratamento de efluentes, localizada no Paraná. O modulador biológico concentrado é composto de *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus pumilus* e a levedura *Saccharomyces cerevisiae*. Outro produto utilizado foi o bioestimulador concentrado composto de biosurfactantes, biocatalisadores e estabilizadores orgânicos e minerais, fornecidos por esta mesma empresa.

4.2 Metodologia

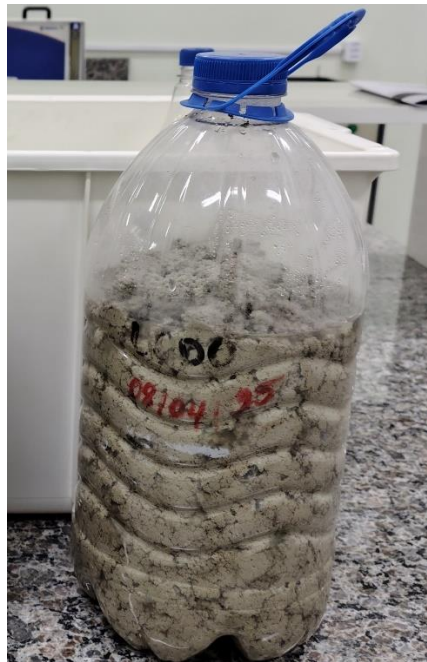
Os experimentos foram realizados no Laboratório de Tratamento de Resíduos, no Laboratório de Análise de Alimentos e no Laboratório de Microbiologia do IFRS – *Campus* Erechim. A metodologia a seguir foi baseada nos testes executados por Haubert (2015). Está exemplificado abaixo, na Figura 4, a sequência dos processos para realização do ensaio de biodegradação.

Foi realizada uma caracterização inicial do lodo e do efluente bruto através da avaliação da cor, temperatura e medição do seu pH.

O efluente possuía característica de cor acinzentada, Figura 2. As dosagens de efluente para os experimentos foram realizadas com o efluente a temperatura ambiente, de 20 °C. O pH do efluente foi medido e, inicialmente, apresentou o valor de 5,6 que foi então corrigido através da adição de hidróxido de sódio 1N até atingir pH 7.

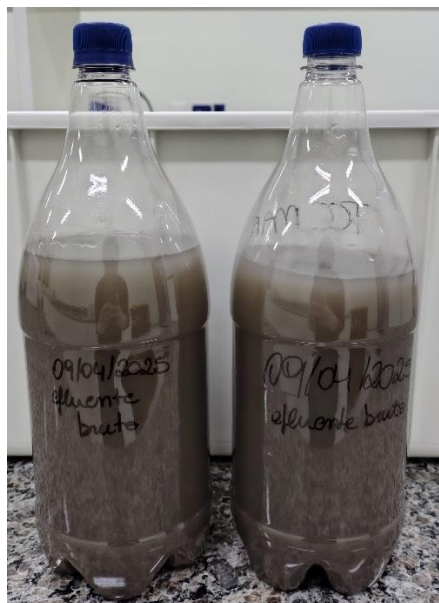
O lodo, por sua vez, apresentava cor acinzentada e era formado por grumos. O pH medido do lodo foi de 5,5 e este material foi fracionado entre os experimentos a temperatura ambiente de 20°C. Não foi feita correção de pH para o lodo adensado.

Figura 2 – Lodo adensado.



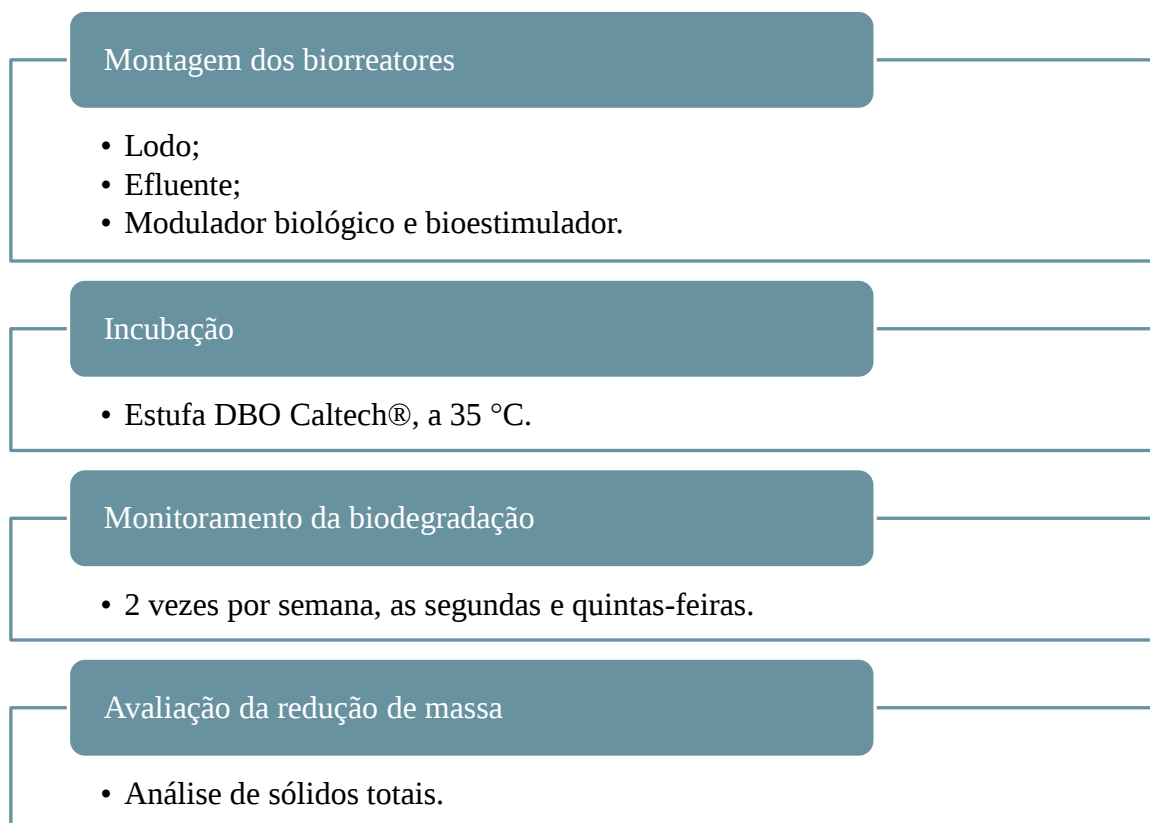
Fonte: Autor (2025).

Figura 3 – Efluente bruto.



Fonte: Autor (2025).

Figura 4 – Ensaio de biodegradação.



Fonte: Autor (2025).

4.2.1 Montagem dos biorreatores

O processo de biodegradação dos resíduos foi realizado em reatores de bancada, utilizando frascos de DBO de 300 mL (Figura 5). A proporção utilizada por Haubert (2015), no estudo aplicado à redução de volume de lodo proveniente de um curtume, foi de 1:25:250 para extrato, biomassa e solução nutriente. Para este estudo, de acordo com o volume de material disponibilizado pelas empresas, foi utilizada a mesma proporção para modulador biológico, lodo e efluente bruto com bioestimulador (2%). Sendo assim, foram utilizadas as medidas de $0,4 \pm 0,0100$ g, $10 \pm 0,1000$ g com precisão de 4 casas decimais e 100 mL (medido em proveta) dos materiais, respectivamente. Os frascos devidamente preparados foram destinados à estufa de DBO para que ocorresse a biodegradação.

O experimento foi realizado em pares, sendo uma amostra padrão contendo apenas o lodo e o efluente, enquanto a segunda amostra foi adicionada de modulador biológico e bioestimulador. Foram realizados 10 pares.

Figura 5 – Frascos de DBO de vidro de 300 mL.



Fonte: Autor (2025).

4.2.2 Incubação

Após montados, os biorreatores foram incubados em estufa DBO Caltech®, Figura 6, a 35 °C, temperatura que fornece condição ideal para o crescimento para bactérias mesofílicas (Simioni, 2021).

Após o período de incubação, Figura 7, as amostras foram retiradas da estufa de biodigestão DBO Caltech ® e levadas para a etapa de remoção de umidade, descrita no item 4.2.4.1.

O período de incubação teve duração total de trinta e nove dias, onde duas vezes por semana em intervalos de 3 e 4 dias um par de biorreatores contendo os testes foram retirados para obtenção de resultados. O primeiro par foi retirado da estufa de biodigestão ao sétimo dia do experimento, em uma quinta-feira, enquanto os demais pares foram sendo removidos às terças-feiras e quintas-feiras. A obtenção dos resultados será descrita no item 4.6.

Figura 6 – Estufa de incubação.



Fonte: Autor (2024).

Figura 7 – Biorreatores incubados.

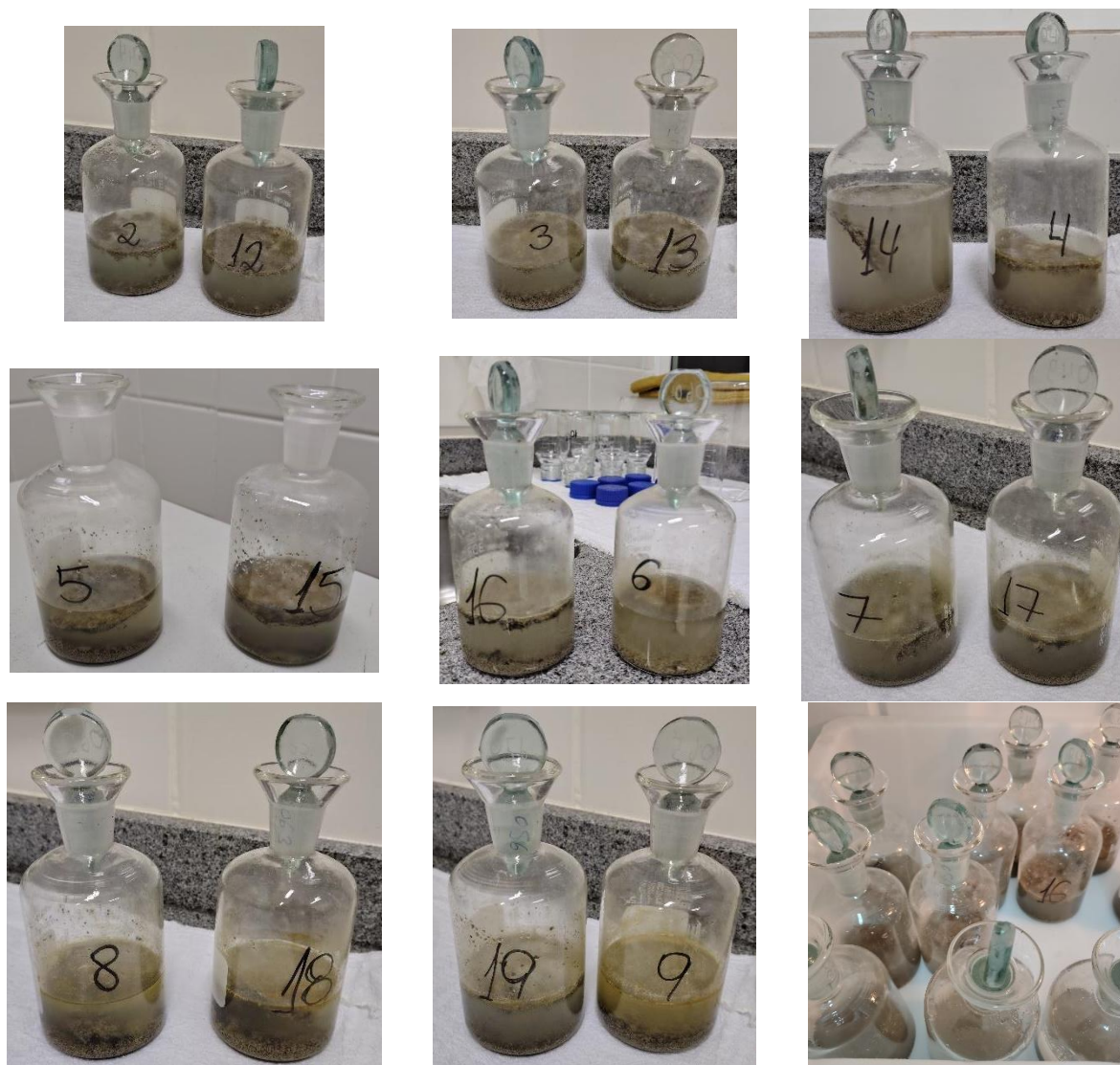


Fonte: Autor (2025).

4.2.3 Monitoramento da biodegradação

O monitoramento da biodegradação, Figura 7, foi realizado através de imagens e, sempre que necessário, foi realizada homogeneização da amostra movimentando os biorreatores de forma circular e vagarosamente. A cada monitoramento um par foi retirado da estufa de biodigestão para que fosse possível comparar a eficiência a partir da perda de massa em diferentes períodos de incubação.

Figura 8 – Monitoramento da biodegradação.



Fonte: Autor (2025).

4.2.4 Redução de massa

A redução de massa dos materiais foi avaliada a partir da análise de sólidos totais, através da Equação 1, que foi realizada nas amostras mensurando a diferença entre as massas de antes e após os períodos de incubação (Simioni, 2021), Figura 9.

$$Dif = m_3 - (m_1 + m_2) \quad (1)$$

Figura 9 – Amostra após período de incubação e secagem.



Fonte: Autor (2025).

4.2.4.1 *Análise de sólidos totais*

A análise de umidade foi realizada baseada na norma NBR ISO 4684 (2014) através do método gravimétrico. O recipiente biorreator vazio, foi seco em estufa a 108 °C durante 2 horas. Após a secagem, foi feita a pesagem do recipiente previamente resfriado em dessecador e medida a sua massa (m_1). Um quantitativo de amostra de 10 g somado à massa de modulador biológico (m_2) foi pesado no biorreator e então voltou à estufa por no mínimo 6 horas e até que atingisse peso constante. A massa do efluente líquido e do bioestimulador foram desprezadas por apresentarem um baixo percentual de material sólido e considerando que essa massa líquida foi perdida no processo de secagem. A medida de massa ao final deste processo é m_3 . A fórmula para obter o percentual de umidade é descrita a seguir, na Equação 222:

$$Umidade (\%) = \frac{(m_1 + m_2) - m_3}{m_2} \times 100 \quad (2)$$

A partir do valor de umidade percentual, foi possível calcular os sólidos totais através da Equação 2 (Lutz, 2008).

$$Sólidos totais = 100 - Umidade (\%) \quad (3)$$

A redução percentual média foi calculada a partir da Equação 4:

$$\text{Redução média} = \left(\frac{\text{dif.média}}{\text{nº de ensaios}} \right) \times 100 \quad (4)$$

4.2.5 Avaliação econômica da aplicação

A avaliação econômica da aplicação do modulador biológico foi conduzida a partir dos dados obtidos experimentalmente e de estimativas de mercado, considerando os custos com disposição de lodo industrial e aquisição do produto biológico. A análise teve como objetivo comparar a eficiência da biodegradação do lodo com e sem o uso do modulador biológico, bem como verificar se sua aplicação representa uma alternativa economicamente viável para reduzir o volume de resíduos sólidos em estações de tratamento de efluentes.

A partir da comparação de redução de volume entre os pares, foi possível comparar os custos envolvidos em ambas as operações e, desta forma, avaliar a aplicabilidade da utilização do modulador biológico.

A avaliação econômica da aplicação do modulador biológico teve como base os custos de mercado praticados para o tratamento e disposição de lodo industrial e para a aquisição do produto biológico. O objetivo foi estimar a economia gerada com a redução do volume de lodo a ser disposto, a partir da aplicação do modulador biológico.

Para obter o valor por quilograma de lodo para disposição final, foi utilizada a Equação 5 a seguir:

$$\text{Custo por kg de lodo} = \frac{\text{custo da disposição}}{\text{volume da carga}} \quad (5)$$

Para estimar o quanto de lodo permaneceu ao final do processo de digestão anaeróbia, com base na redução percentual média de massa obtida nos experimentos, foi utilizado a Equação 6:

$$V_f = V_i \times (1 - \text{Redução média}) \quad (6)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados obtidos nos experimentos, determinou-se a diferença entre a massa final e a massa inicial, Tabela 1, calculada através da Equação 1. Os valores negativos representam a redução de massa.

Tabela 1 – Resultados de diferença entre massa inicial e final.

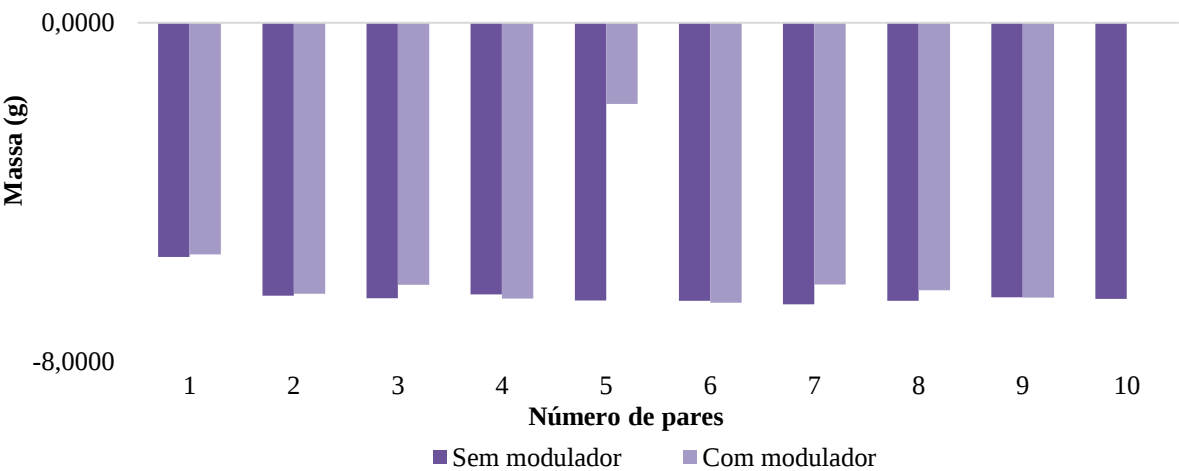
Pares	Sem modulador	Com modulador
1	-5,5171	-5,4573
2	-6,4310	-6,387
3	-6,4931	-6,1757
4	-6,4027	-6,5043
5	-6,5439	-1,9105
6	-6,5506	-6,5997
7	-6,6376	-6,1705
8	-6,5548	-6,3088
9	-6,4738	-6,4758
10	-6,5088	0,0000
Média	-6,4113	-5,1990

Fonte: Autor (2025).

Os resultados médios para redução de massa foram de 6,4113 g para ensaios sem o modulador biológico e 5,1990 g para ensaio com o modulador biológico. Desta forma, constatou-se que ocorreu maior redução de massa para amostras sem o modulador biológico. A média geral de redução de massa foi de 5,8052 g, considerando todos os ensaios.

De forma gráfica observou-se a variação o de massa entre os pares, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Comparativo de oscilação de massa entre pares.



Fonte: Autor (2025).

Conforme exposto na Figura 10 e Tabela 1, o ensaio de número 10 com modulador não apresentou redução no volume do lodo. Este evento inesperado pode ser explicado por Neshat *et al.* (2017) como a consequência de desequilíbrios microbianos, entrada de oxigênio ou liberação de compostos intermediários não totalmente digeridos – situações que são reconhecidas como obstáculos à estabilidade do processo anaeróbio

Para determinar os sólidos totais, resultados disponíveis na Tabela 3, foi utilizada a Equação 3, tendo como base os resultados obtidos do cálculo da umidade através da Equação 2, Tabela 3.

Tabela 2 – Valores obtidos para umidade do material dosado (lodo e modulador).

Pares	Umidade sem modulador (%)	Umidade com o modulador (%)
1	54,79	54,44
2	64,01	63,86
3	64,81	61,51
4	64,02	65,04
5	65,43	19,09
6	65,36	65,70
7	65,92	61,40
8	65,47	62,81
9	64,62	64,75
10	64,82	0,00
Média	63,92	51,86

Fonte: Autor (2025).

Tabela 3 – Resultados obtidos para o percentual de sólidos totais.

Pares	Sem modulador (%)	Com modulador (%)
1	54,79	54,44
2	64,01	63,86
3	64,81	61,51
4	64,02	65,05
5	65,43	19,09
6	65,36	65,70
7	65,92	61,40
8	65,47	62,81
9	64,62	64,75
10	64,82	102,68
Média	63,92	62,13

Fonte: Autor (2025).

A perda de massa percentual média (umidade) para os ensaios com modulador foi de 51,86%, enquanto que a perda de massa percentual média sem o modulador foi de 63,92%. Comparando com outros estudos, o percentual de redução observado neste trabalho se mostra coerente com os dados da literatura.

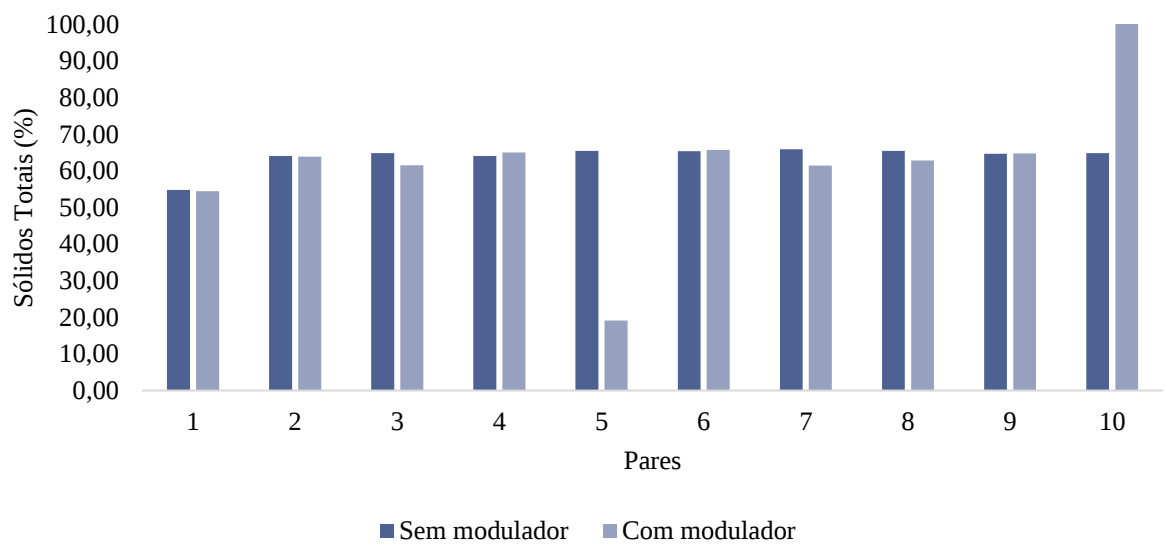
Grasselli (2015) reportou uma redução de 58% da massa de resíduos sólidos de curtumes ao final de 15 dias de incubação anaeróbia. Esse valor é bastante próximo ao verificado nesta pesquisa, sugerindo que mesmo em diferentes tipos de resíduo, a ação microbiológica é consistente.

Haubert (2015), por sua vez, encontrou uma redução de aproximadamente 65% na massa dos resíduos após a digestão anaeróbia de 75 dias, resultado levemente superior ao observado neste trabalho. Isso pode estar relacionado à composição específica do lodo, às condições do processo ou ao tipo de consórcio microbiano utilizado.

Outro dado importante a ser observado é dos sólidos totais que restaram ao final do processo de secagem das amostras, estes valores podem ser comparados na Figura 11. Onde, observa-se que houve uma ligeira redução de sólidos totais quando aplicado o modulador biológico. Para validar o real impacto causado, aplicou-se o método ANOVA aos resultados de sólidos totais, Tabela 4.

Para os ensaios sem o modulador biológico, o resultado final médio para o percentual de sólidos totais foi de 63,92%, ao passo que aqueles com o modulador biológico obtiveram um valor médio de 62,13%

Figura 11 – Comparativo de sólidos totais entre os pares.



Fonte: Autor (2025).

Tabela 4 – ANOVA aplicado aos valores de sólidos totais

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	803,6544	1	803,6544	2,7095	0,1192	4,4939
Dentro dos grupos	4745,537	16	296,596			
Total	5549,191	17				

Fonte: Autor (2025).

Entretanto, o resultado de valor-p superior a 0,05 indica que não houve diferença significativa entre os ensaios com a aplicação do modulador biológico e aqueles sem a aplicação. Da mesma forma, o valor de F obtido no teste ANOVA ($F = 2,7095$) foi inferior ao valor crítico ($F \text{ crítico} = 4,4939$), indicando que não há diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos avaliados ao nível de 5% de significância. Não sendo, desta forma, a aplicação do modulador biológico citado, apropriado para este tipo de lodo.

Os motivos que possam justificar a baixa eficiência da aplicação do modulador biológico comercial são os possíveis efeitos inibidores que estes ensaios possam ter sofrido, ou ainda, pode ser explicado pela incompatibilidade entre o consórcio microbiano adotado e a flora natural do lodo. Ainda, o consórcio aplicado ao modulador biológico concentrado foi descrito

pelo fabricante como indicado para indústrias que possuam altas cargas de gordura e proteína animais na composição do efluente bruto. O que não é o caso do lodo utilizado neste estudo, que por ser proveniente de uma estação de tratamento de efluentes de uma indústria de doces e balas, deve ser rico em carboidratos e gorduras vegetais.

De acordo com Neshat *et al.* (2017), a digestão anaeróbia é altamente sensível à presença de intermediários metabólicos e compostos tóxicos, os quais, em concentrações elevadas, podem interromper etapas cruciais do processo, como a acidogênese e a metanogênese, descritas na Figura 1. Entre os principais inibidores descritos neste trabalho, destacam-se os ácidos graxos voláteis a amônia, os compostos fenólicos, os íons de sódio, os sulfetos. Ainda, pode-se apontar que, como durante o processo de incubação não foi realizado ajuste de pH, este também pode ser o causador da inibição microbiana.

Essas evidências fundamentam a hipótese de que a composição microbiana do produto comercial aplicado (modulador biológico) pode não ter sido compatível com a natureza do lodo tratado, sendo possivelmente mais sensível à presença desses inibidores do que a microbiota nativa da digestão convencional.

5.1.1 Avaliação econômica parcial da aplicação

O custo médio para o transporte e descarte de lodo industrial, conforme valores obtidos a partir de cotação com empresa especializada localizada em Chapecó, SC, é de R\$ 500,00 por caçamba de 7.000 kg. O que representa um custo de aproximadamente R\$ 0,071 por kg de lodo transportado, Equação 5.

Nos ensaios realizados, observou-se que a digestão anaeróbia, mesmo sem aditivos, promoveu uma redução significativa na massa do lodo. Para estimar a eficiência do processo, foi utilizada a Equação 3.

A redução de massa de 51,29 % com digestão anaeróbia implica que apenas 48,71 % do lodo permanece ao final do processo, conforme calculado, utilizando a Equação 6. Deste modo, estima-se que 3.409,7 kg de lodo restariam ao final do tratamento de 7000 kg de lodo bruto. Com isso, o novo custo de descarte seria R\$ 242,08. Avaliando de forma simples, a economia por caçamba seria de R\$ 257,92.

Entretanto, ao aplicar o modulador biológico, há um custo adicional com o produto. Considerando a dosagem de 0,4 g de modulador biológico por 10 g de lodo (4%), para 7.000 kg de lodo seriam necessários 280 kg de modulador biológico que, por sua vez, possui custo unitário por embalagem de 1 kg de R\$ 60,00 e, ao total, seriam aplicados R\$ 16.800,00.

Este valor é significativamente superior à economia obtida com a redução de volume. Além disso, como a redução de massa com modulador biológico foi inferior à do controle, não há ganho operacional no volume de descarte.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da digestão anaeróbia na redução de volume de lodo proveniente de uma estação de tratamento de efluentes industriais da área de alimentos, comparando o desempenho do processo com e sem a aplicação do modulador biológico modulador biológico.

Os resultados obtidos demonstraram que a digestão anaeróbia convencional apresentou melhor desempenho, com média de redução de massa de 63,92%, enquanto o tratamento com adição do modulador biológico apresentou redução média de 51,59%. Além disso, a avaliação econômica indicou que a aplicação do produto comercial representa um custo adicional elevado (R\$ 16.800,00 por 7.000 kg de lodo) sem retorno econômico proporcional em termos de redução de volume e custos de descarte.

Apesar do desempenho inferior do modulador biológico nas condições testadas, é importante considerar que o resultado pode estar relacionado à composição microbiana do produto. O consórcio de microrganismos presente no modulador pode não ter sido compatível com o perfil microbiológico ou com as características físico-químicas do lodo utilizado, o que pode ter limitado sua atividade metabólica e, consequentemente, sua eficiência na degradação da matéria orgânica. Assim, é possível que moduladores formulados com cepas bacterianas mais adaptadas ao tipo específico de lodo tratado apresentassem resultados superiores.

Dessa forma, conclui-se que, nas condições analisadas, a digestão anaeróbia convencional se mostrou mais eficiente e economicamente viável para a redução do lodo industrial. No entanto, a aplicação de moduladores biológicos não deve ser descartada, mas sim investigada com maior profundidade, considerando a seleção de cepas compatíveis com o substrato alvo, a adaptação microbiológica e a possibilidade de sinergia com os microrganismos nativos. Estudos futuros com foco na caracterização microbiológica do lodo e na personalização dos consórcios bacterianos podem contribuir para melhorar o desempenho de produtos biológicos aplicados ao tratamento de resíduos industriais.

REFERÊNCIAS

- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Orgs.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2001. Série Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 6. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/ENGD-6SXHZW/1/190m.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ISO 4684: Couro - ensaios químicos - determinação da matéria volátil. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004-1: Resíduos sólidos - classificação – parte 1: requisitos de classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10561: Águas - determinação de resíduo sedimentável (sólidos sedimentáveis) - método do cone de Imhoff - método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- AVELINO NETO, Sebastião; LIMA, Victor Hugo Almeida. **Eficiência de uma estação de tratamento de efluentes: um estudo para o distrito agroindustrial de Anápolis**. Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 16, n. 4, p. 197-213, dez. 2023. ISSN 1981-4089. Disponível em: <https://doi.org/10.31668/mirante.v16i4.14564>. Acesso em: 03 jan. 2024.
- BAPTISTA, João Lucas Mendes; RODOLPHO, Daniela. Gestão dos resíduos na indústria alimentícia. **Interface Tecnológica**, v. 18, n. 1, p. 567-579, 2021. DOI: 10.31510/inf.v18i1.1139 Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/1139>. Acesso em: 08 dez. 2024.
- BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. São Paulo: CETESB, 1993. Cap. 5. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/handle/123456789/2843>. Acesso em: 22 jun. 2025.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 313, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, [2002]. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/residuos-solidos/residuos-solidos-industriais/resolucao-conama-no-313-2002.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2025.
- BRUCHA, Gunther. **Influência dos nutrientes nitrogênio e fósforo na degradação anaeróbia do pentaclorofenol e na diversidade microbiana dos sedimentos enriquecidos do Estuário de Santos-São Vicente, Estado de São Paulo**. 2007. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2007. doi:10.11606/T.18.2007.tde-30052008-180444. Acesso em: 05 jan. 2025.
- CREMONEZ, Paulo André; TELEKEN, Joel Gustavo; MEIER, Thompson Ricardo Weiser; ALVES, Helton José. Two-stage anaerobic digestion in agroindustrial waste treatment: a review. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 281, p. 1–12, 2021. Online. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111854>. Acesso em: 08 jul. 2025.

FAN, L. *et al.* Influence of various pre-treatment strategies prior to *Bacillus subtilis* aided aerobic digestion of sewage sludge: disintegration of sludge flocs, transformation of dissolved organic matter and removal of TrOCs. **Environmental Research**, [S. l.], v. 224, p. 1–11, 2023. *Online*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115465>. Acesso em: 22 jun. 2025.

GRASSELLI, Letícia Pavoni. **Redução da carga orgânica de resíduos sólidos de curtumes através da biodegradação**. 2015. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/131300>. Acesso em: 19 set. 2024.

GUERI, Matheus Diniz; SOUZA, Samuel Nelson Melegari de; KUCZMAN, Osvaldo. PARÂMETROS OPERACIONAIS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS ALIMENTARES: UMA REVISÃO. **BIOFIX Scientific Journal**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 17–25, 2017. DOI: 10.5380/biofix.v3i1.55837. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/biofix/article/view/55837>. Acesso em: 5 jan. 2025.

GUO, L. *et al.* Enhancement of acidogenic fermentation of *Chlorella vulgaris* using *Bacillus licheniformis*: performance and microbial community dynamics. *Bioresource Technology*, v. 267, p. 112–120, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.090>. Acesso em: 22 jun. 2025.

HAUBERT, Gustavo. **Redução da massa de resíduos sólidos de curtumes ao longo da biodegradação**. 2015. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/131329>. Acesso em: 19 set. 2024.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos físico-químicos para análise de alimentos. 4. ed. digital. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/nutricaoobromatologia/files/2013/07/NormasADOLFOLUTZ.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.

JAIN, S.; PRADHAN, N. Anaerobic digestion of glucose and food waste using yeast: a review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, v. 36, 102148, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102148>. Acesso em: 22 jun. 2025.

JUNG, S. *et al.* Upgrading biogas into syngas through dry reforming. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 143, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110906>. Acesso em: 12 jul. 2025.

KIPPER, Eduardo. **Tratamento enzimático e produção de biogás por resíduos sólidos de curtume**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/96507>. Acesso em: 19 set. 2024.

KRAEMER, B. M. *et al.* Biotechnological tools for sustainable management of sludge from wastewater treatment plants. *Environmental Technology Reviews*, v. 10, n. 1, p. 1-17, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/21622515.2021.1877964>. Acesso em: 22 jun. 2025.

LI, H. *et al.* Application of *Bacillus subtilis* in the hydrolysis phase of anaerobic digestion to enhance biogas production from food waste. *Waste Management*, v. 118, p. 730–739, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.049>. Acesso em: 22 jun. 2025.

MADEIRA, T. M. S.; CAETANO, N. S.; MORAIS, L. C. P.; RIBEIRO, A. A. C.; PIMENTA, T. A. **Processos alternativos para a valorização de resíduos da indústria de curtumes**. 2009. Relatório – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2009. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/7124>. Acesso em: 19 set. 2024.

MENEGHEL, B. L.; SILVA, A. J. da. Remoção de fósforo e nitrogênio de lodo gerado em processo de eletrocoagulação por meio de precipitação na forma de estruvita. In: LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023, 18-21 out. 2023, Ribeirão Preto. **Anais [...]**. Ribeirão Preto, SP: 2023. p. 4.

MENEZES, P. S.; SILVA, R. A.; SOUZA, A. P. Bioaugmentation of activated sludge using *Bacillus pumilus*: performance and settling properties. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, v. 59, n. 2, p. 222–229, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820220960>. Acesso em: 22 jun. 2025.

MIRMOHAMADSADEGHI, S. *et al.* Biogas production from food wastes: A review on recent developments and future perspectives. *Bioresource Technology Reports*, [S. l.], n. 100202, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100202>. Acesso em: 8 jul. 2025.

NESHAT, S. A. *et al.* Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 79, p. 308–322, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.137>. Acesso em: 8 jul. 2025.

PEREIRA, Murilo Henrique Maioli Pessoa. **Estudo de caso em uma indústria de alimentos: estratégias de gestão de resíduos sólidos para minimização dos resíduos enviados à aterro**. 2017. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/38710>. Acesso em: 08 dez. 2024.

PICCIN, Jeferson Steffanello. **Resíduo sólido da indústria coureira como adsorvente alternativo de corantes**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/86462>. Acesso em: 19 set. 2024.

SANTOS, V. M. L. dos; FREITAS, G. H. de L.; AMORIM, M. C. C. de. Otimização da digestão anaeróbia de resíduos agrícolas: prospecção científica de alcalinizantes alternativos. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 253–264, 2024. DOI: 10.24221/jeap.9.4.2024.6228.253-264. Disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/6228>. Acesso em: 5 jan. 2025

SANTOS, L. de O. L.; PIRES, M. S. G. ; OKADA, D. Y. . Geração de biogás a partir da digestão anaeróbia de resíduos da dieta de cultivo de insetos. **Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 473–484,

2024. DOI: 10.22201/iingen.0718378xe.2024.17.2.81126. Disponível em:
<https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/81126>. Acesso em: 5 jan. 2025.

SIMIONI, Taysnara. **Digestão anaeróbia de resíduos sólidos da indústria coureira, co-digestão com resíduos agrícolas e utilização de digestato em cultivo agrícola**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/237452>. Acesso em: 03 jan. 2024.

SOLDERA, Denis; KÜHN, Daniela Dias. **Indicadores de viabilidade financeira: considerações sobre instrumentos de análise**. In: GESTÃO AGROINDUSTRIAL: GEPAI – Grupo de Estudos e Pesquisas Agroindustriais. São Paulo: Atlas, 2009. v. 2, cap. 2, p. 41-59. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/185993/001083140.pdf> . Acesso em: 14 nov. 2024.