

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
*CAMPUS* LAGOA DO SINO  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

GABRIEL FERNANDES ANTUNES

**ATERRO ZERO NA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA: PROPOSTA E AVALIAÇÃO  
DE UM BIODIGESTOR ANAERÓBIO EM COZINHAS INDUSTRIAIS**

BURI-SP  
2025

GABRIEL FERNANDES ANTUNES

**ATERRO ZERO NA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA: PROPOSTA E AVALIAÇÃO  
DE UM BIODIGESTOR ANAERÓBIO EM COZINHAS INDUSTRIAIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade Federal de São Carlos como  
requisito para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Ambiental.

Orientador: Yovana María Barrera Saavedra

Buri-SP

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

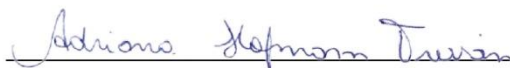
**Folha de Aprovação**

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do(a) candidato(a) Gabriel Fernandes Antunes, realizada em 10/11/2025:




---

Dra. Yovana María Barrera Saavedra – Orientadora  
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.



---

Dra. Adriana Hofmann Trevisan  
Politécnico de Milão (POLIMI-IT)

Documento assinado digitalmente  
 JORGE LUIS RODRIGUES PANTOJA FILHO  
Data: 17/11/2025 09:46:19-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Jorge Pantoja  
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

Antunes, Gabriel Fernandes

ATERRO ZERO NA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA:  
PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE UM BIODIGESTOR  
ANAERÓBIO EM COZINHAS INDUSTRIAIS / Gabriel  
Fernandes Antunes -- 2025.  
45f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,  
campus Lagoa do Sino, Buri  
Orientador (a): Yovana María Barrera Saavedra  
Banca Examinadora: Jorge Pantoja, Adriana Trevisan  
Bibliografia

1. Gestão de resíduos industriais. 2. Viabilidade  
econômica. 3. Economia circular. I. Antunes, Gabriel  
Fernandes. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática  
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

## **AGRADECIMENTO**

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha formação.

Em primeiro lugar, à minha mãe, Rubia Mara Fernandes Antunes, cujo apoio incondicional foi o alicerce fundamental durante toda a minha jornada acadêmica. Seu esforço, amor e dedicação incansável, especialmente após a partida precoce do meu pai, tornaram possível a concretização deste sonho. Ao meu pai Luis Carlos Antunes, in memoriam, cuja ausência física jamais diminuiu a força dos seus ensinamentos e o amor que me impulsiona.

Ao meu irmão mais novo, Rafael Fernandes Antunes, meu eterno companheiro, agradeço pela amizade, pelas risadas e pela parceria constante em todas as fases da minha vida.

À minha tia e madrinha, Regiani Fátima Fernandes Azanha, pelo carinho, pela torcida e por ser um pilar de apoio fundamental não só para mim, mas também para minha mãe durante todo este percurso.

À minha avó, Maria Lucinda Fattori Fernandes, por sempre incentivar a busca pelo conhecimento e por me ensinar, com seu exemplo de vida, o valor inestimável da persistência e a importância de nunca desistir diante dos desafios.

À Universidade Federal de São Carlos, Campus Lagoa do Sino, palco de anos inesquecíveis de aprendizado e crescimento. Foi neste ambiente vibrante que não apenas adquiri conhecimento técnico, mas também construí amizades verdadeiras, encontrando amigos que considero irmãos para a vida. Sou imensamente grato pelas experiências vividas e pelas oportunidades oferecidas.

Neste mesmo campus, tive a felicidade de conhecer Ana Laura de Souza Fantinati, minha companheira, com quem hoje divido a vida, os desafios e os sonhos. Agradeço imensamente por seu amor, paciência, compreensão e apoio incondicional em todos os momentos, especialmente na reta final deste trabalho.

Por fim, agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Yovana Maria Barrera Saavedra, pela confiança depositada na ideia inicial deste projeto, pela orientação segura e precisa, e pelas valiosas contribuições que agregaram profundidade acadêmica e rigor científico à pesquisa. Sua disponibilidade, apoio e incentivo foram essenciais para a conclusão deste TCC.

## RESUMO

O gerenciamento inadequado de resíduos sólidos industriais representa um significativo desafio ambiental e econômico. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica, bem como os principais impactos ambientais, da implementação de um biodigestor anaeróbio compacto para o tratamento de resíduos orgânicos gerados nas cozinhas industriais de uma empresa do setor químico e petroquímico, como uma estratégia inicial para a adoção do conceito de Aterro Zero. A metodologia consistiu em um estudo de caso de abordagem quali-quantitativa, envolvendo a caracterização dos resíduos, a análise de custos do sistema atual, a avaliação comparativa de propostas técnico-comerciais e a identificação qualitativa dos impactos socioambientais da alternativa proposta. Os resultados indicaram uma geração de 277,73 kg/dia de resíduos orgânicos, cuja gestão atual via aterro representa um custo anual superior a R\$ 100.000,00. A análise comparativa demonstrou que, enquanto a alternativa de compostagem externa se mostrou economicamente inviável, a solução de biodigestão (Fornecedor A) apresentou-se vantajosa, com investimento de R\$ 17.000,00 e *payback* de aproximadamente 11 meses, gerando uma economia superior a R\$ 40.000,00 em três anos. Em termos ambientais, a proposta permite o desvio de 73,3 toneladas anuais de resíduos do aterro sanitário, evitando a geração de metano, equivalente a aproximadamente 125 toneladas de CO<sub>2</sub> e por ano, identificando ainda um potencial energético estimado de 44 MWh/ano, além de eliminar as emissões do transporte externo. Conclui-se que a implementação da tecnologia é viável e estratégica, pois mitiga custos operacionais e promove benefícios ambientais, sociais e operacionais significativos, alinhando a empresa aos princípios da Economia Circular e da sustentabilidade.

Palavras-chave: Gestão de Resíduos Industriais; Viabilidade Econômica; Economia Circular; Biodigestão Anaeróbia; Aterro Zero.

## ABSTRACT

The inadequate management of industrial solid waste represents a significant environmental and economic challenge. Therefore, this study aims to analyze the technical and economic viability, as well as the main environmental impacts, of implementing a compact anaerobic biodigester for the treatment of organic waste generated in the industrial kitchens of a company in the chemical and petrochemical sector, as an initial strategy for adopting the Zero Landfill concept. The methodology consisted of a qualitative-quantitative case study, involving waste characterization, cost analysis of the current system, comparative evaluation of technical-commercial proposals, and the qualitative identification of the proposed alternative's socio-environmental impacts. The results indicated an average generation of 277.73 kg/day of organic waste, whose current landfill management represents an annual cost exceeding BRL 100,000.00. The comparative analysis demonstrated that, while the external composting alternative proved to be economically unfeasible, the biodigestion solution (Supplier A) presented itself as advantageous, with an investment of BRL 17,000.00 and a payback period of approximately 11 months, generating savings over BRL 40,000.00 in three years. Environmentally, the proposal allows diverting 73.3 annual tons of waste from landfill, avoiding methane generation, equivalent to approximately 125 tons of CO<sub>2</sub>e per year, also identifying an estimated energy potential of 44 MWh/year, in addition to eliminating external transport emissions. It is concluded that implementing the technology is a viable and strategic alternative, as it mitigates operational costs and promotes significant environmental, social, and operational benefits, aligning the company with the principles of the Circular Economy and sustainability.

Keywords: Industrial Waste Management; Economic Viability; Circular Economy; Anaerobic Digestion; Zero Landfill.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama Borboleta da Economia Circular: ciclos técnico e biológico	18
Figura 2 - Fases bioquímicas do processo de digestão anaeróbia	21
Figura 3 - Fluxograma visual do processo atual de gestão de resíduos orgânicos	29
Figura 4 - Composição percentual dos custos da gestão atual.	30
Figura 5 - Exemplo de biodigestor anaeróbio compacto para resíduos alimentares	31
Figura 6 - O Ciclo do Resíduo Orgânico no Biodigestor	34
Figura 7 - Fluxograma do processo de descarte de resíduos	36
Figura 8 - Comparativo de Custo Total em 36 meses	39
Figura 9 - Análise de Payback do Investimento	40

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 - Geração de Resíduos Orgânicos	28
Tabela 2 - Custos da Gestão Atual de Resíduos	31
Tabela 3 - Análise Comparativa de Custos	38
Quadro 1 - Estimativa de Composição dos Resíduos Orgânicos	28
Quadro 2 - Síntese Comparativa das Propostas Técnicas	33
Quadro 3 - Síntese dos Impactos Ambientais e Efeitos Esperados	41
Quadro 4 - Análise de Custos da Compostagem	44
Quadro 5 - Matriz Comparativa Final: Aterro vs. Biodigestor vs. Compostagem	45

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> (Despesa de Capital)
ESG	<i>Environmental, Social, and Governance</i> (Ambiental, Social e Governança)
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
GEE	Gases de Efeito Estufa
MTR	Manifesto de Transporte de Resíduos
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEX	<i>Operational Expenditure</i> (Despesa Operacional)
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
ZWIA	<i>Zero Waste International Alliance</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos:	15
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
3.1	Gestão de Resíduos Sólidos na Indústria	16
3.1.1	Particularidades no Setor Químico e Petroquímico	16
3.1.2	O Desafio dos Resíduos Orgânicos de Cozinhas Industriais	16
3.1.3	A Política Nacional de Resíduos Sólidos e a Hierarquia de Gestão	17
3.2	O Conceito de Economia Circular e Aterro Zero	18
3.3	Tratamento de Resíduos Orgânicos: Tecnologia de Biodigestão Anaeróbia	19
3.4	Estudos de Caso Semelhantes na Literatura	22
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA DE PESQUISA</b>	<b>23</b>
4.1	Caracterização da Pesquisa	24
4.2	Objeto de Estudo	24
4.3	Procedimentos para Coleta de Dados	25
4.4	Métodos de Análise dos Dados	26
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>27</b>
5.1	Caracterização e quantificação dos Resíduos Orgânicos das Cozinhas Industriais	27
5.2	Análise da Gestão Atual e Custos Associados	29
5.3	Proposta de Implementação do Biodigestor: Viabilidade Técnica	31
5.3.1	Análise Comparativa das Propostas Técnicas	32
5.3.2	Princípio de Funcionamento da Tecnologia	33
5.3.3	Requisitos de Instalação e Adequações	35
5.3.4	Análise de Viabilidade Técnica e Operacional	35
5.4	Análise da Viabilidade Econômica	37
5.5	Principais Impactos Ambientais e Sociais da Proposta	41
5.5.1	Impactos Ambientais	41
5.5.2	Impactos Sociais e Operacionais	42
5.6	Análise da Alternativa: Compostagem	43
5.6.1	Análise de Viabilidade Técnica e Operacional	43

5.6.2	Análise de Viabilidade Econômica	44
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O debate sobre a temática ambiental não é recente, tendo ganhado força no cenário mundial desde a Conferência de Estocolmo em 1972, um evento seminal que desencadeou uma série de discussões globais, posteriormente reforçadas por marcos como o Relatório Brundtland (1987) e o Acordo de Paris (2015). O objetivo comum que perpassa esses encontros é a tentativa de harmonizar o crescimento econômico com a sustentabilidade, de modo a garantir a preservação dos recursos naturais para as próximas gerações (Andrade, 2018).

Dentro desse panorama, o gerenciamento de resíduos sólidos desponta como um dos desafios mais urgentes. A Organização das Nações Unidas (ONU) estima que, na América Latina, a produção de resíduos por pessoa se aproxima de 1 kg diário, com um terço desse volume sendo ainda destinado a aterros sanitários inadequados (ONU, 2022). No Brasil, dados recentes do último relatório da ABREMA (2024) mostram que a geração é igualmente de 1 kg por pessoa, reforçando a magnitude do problema no contexto nacional. O país está entre os principais geradores de resíduos da região, o que intensifica a demanda por soluções criativas (ONU, 2022). Uma gestão de resíduos inadequada acarreta uma série de consequências adversas, incluindo o uso insustentável de recursos, a liberação de gases de efeito estufa (GEE) e ameaças à saúde da população (Sarkar *et al.*, 2022; Dileep, 2007).

No âmbito industrial, a magnitude do problema é ainda maior. De acordo com o Banco Mundial, o setor industrial produz um volume de resíduos dezoito vezes superior ao volume urbano, dos quais 40% ainda são enviados para aterros (Kaza *et al.*, 2018). A expectativa de contínuo crescimento da produção industrial torna o gerenciamento eficaz uma necessidade premente (Brasil, 2010; Souza; Chaves; Alvim, 2015).

Entre esses resíduos, os orgânicos representam uma fração significativa, especialmente em indústrias alimentícias e agroindustriais, onde a decomposição inadequada pode gerar emissões de metano, um potente gás de efeito estufa, além de atrair vetores e causar contaminação do solo e da água (Araújo *et al.*, 2025). Como reação a este cenário, observa-se uma crescente valorização das práticas de governança Ambiental, Social e Governança (ESG), pois companhias com bom desempenho em sustentabilidade tendem a ser mais resilientes e competitivas (Camara, 2021).

Essas novas diretrizes corporativas estão alinhadas aos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 (ISO, 2020). Inserido neste panorama, o conceito de "Aterro Zero" surge como uma metodologia estratégica, que propõe uma nova visão sobre o resíduo, tratando-o como um recurso a ser valorizado. De forma complementar, a Economia Circular se apresenta como um modelo sistêmico que busca reintegrar materiais na cadeia produtiva, reduzindo desperdícios e promovendo ciclos fechados, sendo fundamental para alcançar metas como o Aterro Zero (UNEP, 2017). O objetivo é eliminar a sua destinação para aterros através da hierarquia de gestão, o que pode gerar benefícios ambientais, sociais e financeiros.

É neste contexto que se insere o presente estudo, focado na análise de uma alternativa para os resíduos orgânicos gerados em cozinhas industriais, um desafio específico dentro da meta maior de Aterro Zero. Diante disso, emerge a seguinte questão de pesquisa: Qual a viabilidade técnica, econômica e ambiental da implementação de um biodigestor anaeróbio para o tratamento de resíduos orgânicos em cozinhas industriais, como passo inicial para a adoção do conceito de Aterro Zero em uma indústria do setor petroquímico?

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral é analisar a viabilidade técnica, econômica, bem como os principais impactos ambientais da implementação de um biodigestor anaeróbio para o tratamento de resíduos orgânicos gerados nas cozinhas industriais de uma empresa do setor químico e petroquímico.

### **2.2 Objetivos Específicos:**

a) Levantar na literatura as principais características dos resíduos sólidos na indústria, bem como estratégias relacionadas ao conceito de aterro zero e à economia circular;

b) Caracterizar os resíduos orgânicos gerados na cozinha industrial da unidade, identificando sua composição e volume;

c) Analisar a gestão atual desses resíduos, verificando sua eficiência, custos e adequação à legislação ambiental vigente;

d) Identificar as dificuldades e oportunidades da aplicação de um biodigestor anaeróbio como alternativa para o tratamento local dos resíduos orgânicos;

e) Identificar e analisar os custos envolvidos na implantação e operação do biodigestor anaeróbio;

f) Identificar os benefícios ambientais e sociais da digestão anaeróbia, como o desvio de resíduos do aterro e a eliminação das emissões de transporte;

g) Avaliar a viabilidade da compostagem como alternativa complementar ou substitutiva ao biodigestor.

Para atingir os objetivos propostos, este trabalho está estruturado em cinco capítulos. O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre gestão de resíduos, Economia Circular e a tecnologia de biodigestão anaeróbia. O terceiro detalha a metodologia da pesquisa, caracterizando o estudo de caso. O quarto capítulo, por sua vez, apresenta e discute os resultados de viabilidade técnica e econômica da proposta, bem como uma análise de alternativas. Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões e recomendações do estudo.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 Gestão de Resíduos Sólidos na Indústria**

O manejo e a destinação final ambientalmente correta dos resíduos representam um componente fundamental para o avanço do Desenvolvimento Sustentável, com uma importância ainda mais notória no setor industrial (Costa *et al.*, 2024). A dimensão deste desafio é significativa, uma vez que o volume de resíduos industriais é consideravelmente superior ao urbano, e uma porção substancial ainda é encaminhada para aterros, em um contexto de provável crescimento contínuo (Kaza *et al.*, 2018).

Nas subseções seguintes, serão exploradas as particularidades do setor químico e petroquímico, os desafios específicos relacionados aos resíduos orgânicos de cozinhas industriais e a aplicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) como diretriz para hierarquização das práticas de gestão.

##### **3.1.1 Particularidades no Setor Químico e Petroquímico**

A indústria química e petroquímica, em particular, enfrenta desafios complexos na gestão de seus resíduos devido à diversidade e, por vezes, periculosidade dos materiais gerados em seus processos produtivos (Silva; Corazza, 2012). Além dos resíduos comuns de escritório e refeitório, o setor gera fluxos específicos como catalisadores usados, lodos de tratamento de efluentes, embalagens contaminadas e eventuais produtos fora de especificação, que demandam tratamentos específicos e licenciamento rigoroso para destinação (CETESB, 2008). A busca por soluções alinhadas à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), priorizando a não geração, redução e valorização, torna-se crucial neste contexto de alta complexidade ambiental e regulatória.

##### **3.1.2 O Desafio dos Resíduos Orgânicos de Cozinhas Industriais**

Um fluxo de resíduo frequentemente negligenciado em grandes plantas industriais, mas significativo em volume e impacto, é o orgânico proveniente das cozinhas e refeitórios. Estes resíduos, compostos por restos de pré-preparo e pós-consumo, podem atingir volumes consideráveis em unidades com grande número de colaboradores (Oliveira; Galbieri; Cunha, 2012).

A gestão tradicional via aterro sanitário, embora comum, gera impactos como a emissão de metano e a produção de chorume, além de custos logísticos e de destinação (Goulart; Wolf; Espinosa, 2019). Estudos apontam a viabilidade de alternativas como a compostagem (Goulart; Wolf; Espinosa, 2019) e a biodigestão anaeróbia (Santos; Barros; Tiago Filho, 2009) como soluções mais sustentáveis para este tipo de resíduo, alinhadas à hierarquia da PNRS que será detalhada a seguir.

### 3.1.3 A Política Nacional de Resíduos Sólidos e a Hierarquia de Gestão

No Brasil, a principal legislação que orienta o tema é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), de 2010. No entanto, a sua completa efetivação ainda enfrenta barreiras, pois, mais de uma década após sua instituição, "a execução das exigências legais ainda encontra obstáculos financeiros e de gestão" (Dugonski *et al.*, 2024, p. 143). Tal entrave afeta diretamente a aplicação do princípio basilar da PNRS, a hierarquia na gestão de resíduos, que o Art. 9º da Lei nº 12.305 detalha da seguinte forma:

Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade:  
I - Não geração;  
II - Redução;  
III - Reutilização;  
IV - Reciclagem;  
V - Tratamento dos resíduos sólidos; e  
VI - Disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Brasil, 2010).

Essa ordem de prioridade, portanto, posiciona a disposição em aterros como a última alternativa a ser cogitada, fomentando a reintegração de materiais na cadeia produtiva e a concepção do resíduo como um recurso com valor econômico e social (Van Ewijk; Stegemann, 2016).

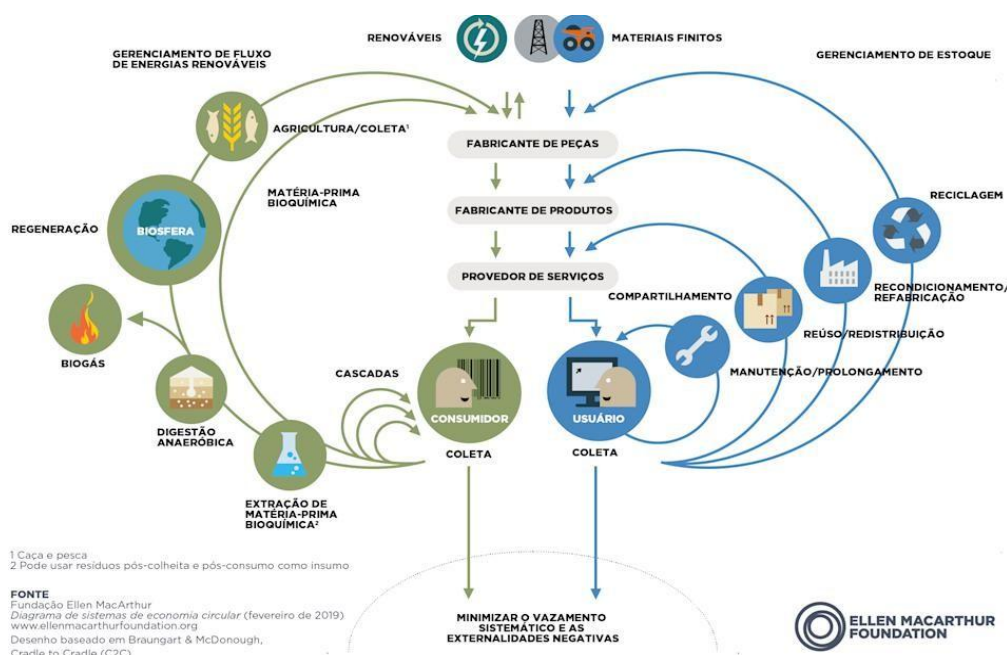
Essa valorização do resíduo conecta-se diretamente às demandas contemporâneas por maior responsabilidade corporativa. A pressão exercida por *stakeholders* – incluindo clientes, investidores e órgãos reguladores – por práticas mais sustentáveis na cadeia de valor tem se intensificado. Nesse contexto, a gestão avançada de resíduos deixa de ser apenas uma questão operacional ou legal, tornando-se um fator crucial para a reputação, a competitividade e a própria licença ambiental da empresa para operar (Seuring *et al.*, 2008).

### 3.2 O Conceito de Economia Circular e Aterro Zero

A migração para sistemas de produção e consumo mais sustentáveis pressupõe o abandono do modelo da economia linear, cuja lógica se baseia em extrair, produzir, usar e descartar. Em oposição a esse sistema, a Economia Circular (EC) surge como um paradigma alternativo, que visa ser restaurador e regenerativo por *design*, conforme popularizado pela Ellen MacArthur Foundation (Ellen MacArthur Foundation, 2015). O conceito se apoia em três princípios chave: (I) projetar sistemas que eliminam a poluição e os resíduos; (II) garantir a circulação contínua de produtos e materiais em seu valor máximo; e (III) promover a regeneração dos sistemas naturais.

A execução da Economia Circular ocorre por meio de dois ciclos de materiais distintos: o técnico (lado direito do diagrama) e o biológico (lado esquerdo). O ciclo técnico foca em prolongar a vida útil de produtos e componentes através de processos como manutenção, reuso, remanufatura e, por fim, a reciclagem. O ciclo biológico, por sua vez, permite que materiais biodegradáveis retornem com segurança à natureza, servindo como nutrientes para o solo. O Diagrama Borboleta, desenvolvido pela Fundação Ellen MacArthur e apresentado na Figura 1, ilustra detalhadamente estes dois ciclos e suas diversas estratégias de circularidade.

Figura 1 - Diagrama Borboleta da Economia Circular: ciclos técnico e biológico



Fonte: Ellen MacArthur Foundation (2019).

Inserida neste novo contexto, a filosofia "Aterro Zero" (*Zero Landfill*) apresenta-se como uma das táticas centrais para a implementação dos preceitos da EC. O conceito propõe o envolvimento de múltiplos atores sociais no gerenciamento responsável de resíduos, baseado na ideia de "reconhecer os resíduos como um recurso, evitando e eliminando o desperdício e recuperando todo o fluxo de resíduos" (Pietzsch; Ribeiro; de Medeiros, 2017). A adoção bem-sucedida da prática de Aterro Zero está atrelada a um conjunto de vantagens: ambientais, como a menor extração de matérias-primas e a redução de emissões de GEE; financeiras, pela redução de custos com descarte e potencial geração de receita com subprodutos; e sociais. Dentre os benefícios sociais, destacam-se a criação de novos postos de trabalho nas cadeias de coleta seletiva, triagem, reciclagem e tratamento; a promoção da educação e conscientização ambiental dos colaboradores e da comunidade envolvida; e a melhoria da saúde pública pela redução da poluição associada aos aterros sanitários (Costa *et al.*, 2024; Dugonski *et al.*, 2024).

A definição mais abrangente do conceito foi formalizada pela *Zero Waste International Alliance* (ZWIA) que o descreve da seguinte maneira:

[Aterro Zero é] a conservação de todos os recursos por meio da produção, consumo, reutilização e recuperação responsáveis de produtos, embalagens e materiais sem queima e sem descargas na terra, água ou ar que ameacem o meio ambiente ou a saúde humana (ZWIA, 2018).

Assim, o Aterro Zero representa mais do que o simples desvio de resíduos; é uma metodologia integral que concretiza as metas da Economia Circular, fomentando um sistema onde os materiais circulam e são valorizados, em vez de eliminados (Ellen MacArthur Foundation, 2015; ZWIA, 2018). Para que essa filosofia seja implementada, no entanto, é essencial o forte engajamento de todas as partes envolvidas, além do desenvolvimento de competências técnicas e de comunicação para assegurar sua efetividade, como demonstram estudos de caso sobre o tema (Costa *et al.*, 2024; Dugonski *et al.*, 2024).

### **3.3 Tratamento de Resíduos Orgânicos: Tecnologia de Biodigestão Anaeróbia**

No contexto industrial, especialmente em plantas com grande número de colaboradores e cozinhas próprias, a geração de resíduos orgânicos (restos de alimentos pré e pós-consumo) pode atingir volumes significativos. A prática comum

para a gestão deste fluxo, como verificado no estudo de caso deste trabalho, envolve a coleta por transportador licenciado e a disposição direta em aterros sanitários. Esta destinação, embora legal, representa a opção de menor prioridade na hierarquia da PNRS e acarreta impactos ambientais relevantes: a decomposição anaeróbia da matéria orgânica no aterro gera chorume, um efluente líquido de alta carga poluidora com potencial para contaminar solo e água, e biogás, uma mistura gasosa rica em metano ( $CH_4$ ), gás com potencial de efeito estufa consideravelmente superior ao do dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (Gomes et al., 2015).

A biodigestão anaeróbia apresenta-se como uma alternativa tecnológica notável para o tratamento desses materiais, em virtude de sua eficiência e das vantagens ambientais que oferece. O método consiste em um complexo processo bioquímico realizado por diferentes grupos de microrganismos (bactérias e arqueas) na ausência de oxigênio, que decompõem a matéria orgânica em produtos mais simples, como metano e dióxido de carbono (biogás), e um material digerido (efluente) (Speece, 1996; Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019). O processo geralmente ocorre em quatro fases interdependentes, conforme ilustrado na Figura 2:

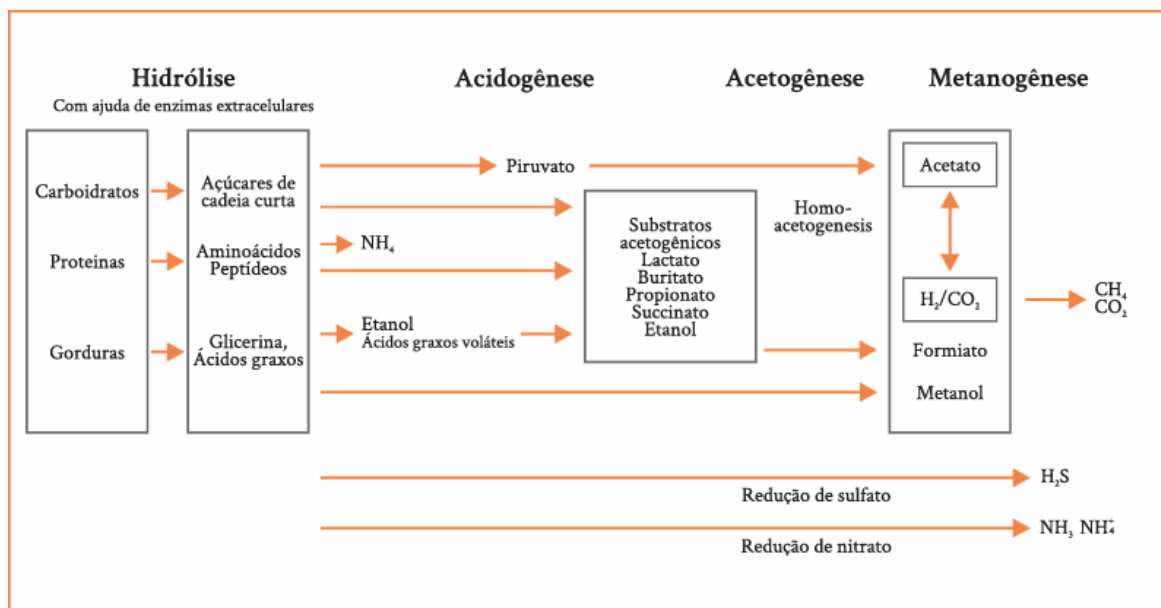
**1. Hidrólise:** Microrganismos hidrolíticos quebram as macromoléculas orgânicas complexas (proteínas, carboidratos, lipídios) em moléculas menores solúveis (aminoácidos, açúcares simples, ácidos graxos).

**2. Acidogênese:** Bactérias acidogênicas fermentam os produtos da hidrólise, gerando principalmente ácidos graxos voláteis (AGVs, como ácido acético, propiônico, butírico), álcoois,  $H_2$  e  $CO_2$ .

**3. Acetogênese:** Bactérias acetogênicas convertem os AGVs de cadeia mais longa e álcoois em ácido acético,  $H_2$  e  $CO_2$ . Esta fase é crucial para fornecer os substratos diretos para a metanogênese.

**4. Metanogênese:** Arqueas metanogênicas utilizam o ácido acético (via acetoclástica) ou o  $H_2$  e  $CO_2$  (via hidrogenotrófica) para produzir metano ( $CH_4$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ), os principais componentes do biogás.

Figura 2 - Fases bioquímicas do processo de digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2011).

Este processo ocorre em reatores selados, chamados de biodigestores. Conforme resume um dos maiores especialistas brasileiros na área:

A digestão anaeróbia pode ser considerada como um processo de tratamento de resíduos orgânicos, que alia a possibilidade de reciclagem da matéria orgânica e dos nutrientes, com a produção de energia (biogás), de forma a atender aos conceitos básicos do desenvolvimento sustentável (Chernicharo, 2007, p. 782).

Ao término do ciclo, cuja duração pode variar de horas a dias conforme a tecnologia empregada, o resíduo é transformado em dois subprodutos principais: o biogás (rico em metano e dióxido de carbono) e um efluente líquido estabilizado (também chamado de digestato), rico em nutrientes. O digestato pode ser destinado a tratamento complementar (como uma ETE) para descarte seguro ou, dependendo de sua qualidade e regulamentações locais, aproveitado como biofertilizante no solo. A viabilidade e o destino de cada subproduto dependem do projeto específico, como será discutido adiante.

As soluções de biodigestão *in loco*, como a que é analisada neste trabalho, proporcionam um tratamento descentralizado, executado na própria unidade geradora. Equipamentos contemporâneos são automatizados e conseguem processar os resíduos em um período de até 24 horas. Conforme detalhado na seção

5.3.2, o escopo das propostas avaliadas neste estudo direciona o efluente líquido gerado para a rede de esgoto/ETE da planta e prevê a simples filtragem e liberação controlada do biogás. No entanto, é importante ressaltar os potenciais de valorização não explorados neste escopo inicial: o biogás poderia, em projetos futuros ou de maior escala, ser purificado e utilizado para geração de energia térmica (por exemplo, na própria cozinha) ou elétrica; e o efluente líquido (digestato), após eventuais análises e adequações, possui potencial para uso como biofertilizante nas áreas verdes da empresa. Mesmo sem esses aproveitamentos adicionais, a abordagem *in loco* já otimiza custos de transporte e descarte, atenua a emissão de odores e eleva os padrões de higiene e segurança ocupacional.

### **3.4 Estudos de Caso Semelhantes na Literatura**

A aplicação do conceito de Aterro Zero tem sido investigada em variados setores da indústria e do comércio no Brasil, o que tem ajudado a validar a viabilidade de tecnologias sustentáveis no gerenciamento de resíduos. Essas pesquisas oferecem uma visão geral das táticas, obstáculos e vantagens observadas, servindo de alicerce para futuros estudos.

Um caso de estudo pertinente foi realizado por Costa *et al.* (2024) em uma companhia do segmento de óleo e gás. A investigação examinou a implementação de um projeto Aterro Zero, revelando que a empresa já operava com uma gestão de resíduos sofisticada, enviando apenas 1% de seu total para aterros. Para zerar essa fração, composta principalmente por resíduos orgânicos, foram implementadas soluções como o coprocessamento para rejeitos e a instalação de um biodigestor para a fração orgânica. Embora o foco do estudo de Costa *et al.* (2024) não tenha sido o detalhamento dos subprodutos, a biodigestão implementada naturalmente gera biogás (com potencial energético) e digestato (efluente com potencial de uso como fertilizante), reforçando o caráter de valorização do resíduo. O trabalho concluiu que a ação geral de Aterro Zero foi exitosa, alinhada a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), e destacou o papel fundamental da educação ambiental dos funcionários para o êxito da iniciativa (Costa *et al.*, 2024).

Focando especificamente na tecnologia de biodigestão anaeróbia para resíduos alimentares, Santos, Barros e Tiago Filho (2009) avaliaram sua aplicação

em um restaurante universitário. O estudo demonstrou a eficiência do processo na redução da carga orgânica (sólidos voláteis) e quantificou a produção de biogás, confirmando a viabilidade técnica da biodigestão como alternativa ao aterro. Os autores ressaltaram o potencial de recuperação energética do metano gerado e a possibilidade de uso agrícola do efluente tratado (digestato), alinhando o tratamento dos resíduos aos princípios de sustentabilidade e economia circular (Santos; Barros; Tiago Filho, 2009).

De forma análoga, Dugonski *et al.* (2024) analisaram a implementação do conceito em um parque turístico brasileiro, o primeiro a alcançar a certificação "Aterro Zero" no país. A tática principal, nesse caso, foi o uso da metodologia *Total Waste Management* (TWM), que assegura uma gestão integrada dos resíduos em colaboração com uma empresa parceira. As alternativas de destinação abrangeram compostagem, reciclagem e coprocessamento. Um dos maiores desafios apontados foi a necessidade de "conscientização, pra utilização correta das lixeiras" pelos visitantes (Dugonski *et al.*, 2024, p. 147), o que reforça a criticidade do fator humano e da comunicação em projetos dessa natureza.

A avaliação desses estudos evidencia a versatilidade e a pertinência do conceito de Aterro Zero em múltiplos contextos, desde a indústria pesada até o setor de serviços. Os exemplos corroboram a viabilidade de diferentes tecnologias de tratamento, como a biodigestão (Costa et al., 2024; Santos; Barros; Tiago Filho, 2009) e a compostagem (Dugonski et al., 2024), e apontam para a importância do envolvimento de todos os interessados. Este trabalho, assim, se alinha a essa corrente de pesquisa, com o intuito de contribuir com um estudo de caso detalhado sobre a gestão de resíduos orgânicos de cozinhas industriais no setor químico e petroquímico, através de uma análise aprofundada da viabilidade da biodigestão anaeróbia.

Diante do embasamento teórico apresentado, o capítulo seguinte detalha os materiais e métodos utilizados para aplicar estes conceitos no estudo de caso prático.

#### **4 METODOLOGIA DE PESQUISA**

#### **4.1 Caracterização da Pesquisa**

Este trabalho caracteriza-se, quanto à sua natureza, como uma pesquisa aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos voltados para a solução de um problema prático e específico: a gestão de resíduos orgânicos em uma unidade industrial. No que tange aos seus objetivos, a pesquisa classifica-se como exploratória e descritiva. É exploratória ao investigar a viabilidade de uma tecnologia pouco difundida no setor em questão, buscando maior familiaridade com o problema, e descritiva ao detalhar as características do cenário atual da gestão de resíduos e do processo de implementação da solução proposta (Gil, 2002).

Para reforçar o rigor metodológico, este estudo também se apoia em princípios de métodos mistos, conforme defendem Creswell e Plano Clark (2018), Dal-Farra e Fetters (2017), Galvão, Pluye e Ricarte (2020) e Oliveira (2024), que destacam a integração de abordagens qualitativas e quantitativas como estratégia para compreensão mais completa de fenômenos complexos e tomada de decisão fundamentada.

Quanto à abordagem do problema, o estudo adota um delineamento qualiquantitativo. A vertente quantitativa se manifesta na análise de viabilidade econômica do projeto, através da comparação de dados numéricos como o volume de resíduos gerados, os custos operacionais da gestão atual e os custos de implantação e operação do biodigestor. A vertente qualitativa, por sua vez, está presente na avaliação dos impactos operacionais, sociais e ambientais da tecnologia, bem como na análise interpretativa dos documentos técnicos e da literatura.

Em relação aos procedimentos técnicos, a pesquisa se baseia em um estudo de caso, que permite examinar em profundidade o fenômeno contemporâneo da implementação de um biodigestor dentro de seu contexto real (Yin, 2014). Este estudo de caso é sustentado por pesquisa documental, a partir da análise de planilhas de custos, propostas comerciais, especificações técnicas de equipamentos e relatórios internos da empresa, e por pesquisa bibliográfica, que fundamenta a discussão teórica em livros, artigos científicos e dissertações.

#### **4.2 Objeto de Estudo**

O presente estudo de caso foi desenvolvido em uma unidade de grande porte, pertencente a uma empresa multinacional de referência no setor químico e petroquímico. Com uma presença consolidada no Brasil, a companhia é uma

importante fornecedora de especialidades químicas que servem como insumos para diversas cadeias produtivas, como os setores de cuidados pessoais, automotivo, de tintas e agronegócio.

A unidade específica onde a pesquisa foi conduzida, no entanto, opera como um centro de serviços de manutenção e assistência técnica para equipamentos de alta complexidade. Esta base funciona 24 horas por dia e conta com um efetivo de aproximadamente 550 colaboradores diretos e indiretos, distribuídos entre setores operacionais e administrativos.

O foco da análise neste trabalho está circunscrito às cozinhas industriais desta unidade de serviços, que são responsáveis pelo preparo de um volume significativo de refeições diárias para atender à força de trabalho. Estas instalações foram selecionadas por serem a principal fonte geradora da fração de resíduos orgânicos que é o objeto central deste estudo de viabilidade, representando um ponto crítico para a implementação de um projeto "Aterro Zero". A escolha das cozinhas industriais como objeto de estudo justifica-se por critérios de relevância ambiental e operacional, uma vez que representam a principal fonte geradora de resíduos orgânicos e, portanto, um ponto estratégico para o avanço rumo à meta de Aterro Zero.

#### **4.3 Procedimentos para Coleta de Dados**

A coleta de dados para este estudo foi realizada em múltiplas etapas, com o objetivo de contemplar os diferentes objetivos específicos da pesquisa. Foram utilizados dados secundários, provenientes da análise de documentos internos da empresa, como relatórios de geração de resíduos, registros de coleta e destinação, e indicadores ambientais. Complementarmente, foram obtidos dados primários por meio da prospecção de informações técnicas e comerciais junto a fornecedores especializados, incluindo especificações de equipamentos para biodigestão anaeróbia, estimativas de custo de implantação e manutenção, e requisitos operacionais para integração ao processo industrial. Essa estratégia permitiu integrar informações internas e externas, assegurando maior consistência e confiabilidade na análise.

Inicialmente, para a caracterização do cenário atual (Objetivos 'a', 'b' e 'c'), foi conduzida uma pesquisa documental baseada em registros internos da unidade industrial. Foram levantados dados quantitativos referentes ao volume médio de geração de resíduos orgânicos da cozinha e os custos associados à sua gestão e destinação externa. Essas informações foram compiladas em planilhas eletrônicas para posterior análise.

Em uma segunda etapa, para a investigação das alternativas tecnológicas (Objetivos 'd', 'e' e 'f'), foram solicitadas e analisadas propostas técnicas e comerciais de empresas fornecedoras de soluções de biodigestão e compostagem. Este levantamento incluiu o estudo de fichas técnicas de equipamentos, memoriais descritivos, manuais de operação e questionários técnicos respondidos pelos fornecedores. O objetivo foi coletar dados precisos sobre os requisitos de instalação, capacidade de processamento, parâmetros operacionais, custos de implantação (CAPEX) e de manutenção (OPEX).

Por fim, todos os dados coletados, tanto do cenário atual quanto das alternativas propostas, foram sistematizados em planilhas comparativas para permitir a análise de viabilidade que será apresentada no capítulo subsequente.

#### **4.4 Métodos de Análise dos Dados**

A análise dos dados coletados foi realizada por meio de uma abordagem mista, fundamentada na comparação entre o cenário atual e as alternativas tecnológicas propostas, a fim de responder aos objetivos de viabilidade técnica, econômica e ambiental.

No âmbito quantitativo, foi empregada uma análise comparativa de custos, confrontando os dispêndios operacionais da gestão de resíduos vigente com os custos projetados para a implantação (CAPEX) e operação (OPEX) do biodigestor, com base em dois fornecedores, e da solução de compostagem. Utilizando os dados sistematizados em planilhas, foram calculados indicadores de viabilidade econômica, como o tempo de retorno do investimento (*payback*) e a potencial redução percentual de custos anuais (cf. Casarotto Filho; Kopittke, 2010).

Para a análise de viabilidade técnica e dos benefícios socioambientais, de natureza qualitativa, foi utilizada a análise interpretativa dos documentos fornecidos pelos fabricantes e das informações levantadas. Esta análise focou em avaliar a compatibilidade da tecnologia com a infraestrutura da empresa, os requisitos operacionais (como mão de obra, espaço físico e pontos de descarte), os benefícios não-quantificáveis (melhoria na segurança do trabalho, higiene, imagem da empresa) e o alinhamento da proposta com as metas de sustentabilidade da organização (cf. Bardin, 2011). A síntese dessas duas análises, quantitativa e qualitativa, fundamenta a discussão sobre a viabilidade geral do projeto, que será apresentada no capítulo subsequente.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo são apresentados e analisados os dados levantados durante a pesquisa, com o objetivo de avaliar a viabilidade da implementação de um biodigestor anaeróbio na unidade industrial em estudo. A análise se inicia com a caracterização dos resíduos gerados e da gestão atual, seguindo para a avaliação técnica e econômica da solução proposta, bem como a análise alternativa de compostagem.

### **5.1 Caracterização e quantificação dos Resíduos Orgânicos das Cozinhas Industriais**

A primeira etapa do estudo consistiu na caracterização dos resíduos sólidos orgânicos gerados, de forma combinada, pelas duas cozinhas das unidades da empresa aqui designadas como Unidade A e Unidade B. A composição destes resíduos é heterogênea, consistindo em sobras de alimentos tanto do pré-preparo quanto do pós-consumo.

Para tornar a caracterização mais analítica, o Quadro 1 apresenta uma estimativa da composição gravimétrica dos resíduos gerados.

Quadro 1 - Estimativa de Composição dos Resíduos Orgânicos

<b>Tipo de resíduo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Percentual Estimado</b>
Pré-preparo	Aparas, cascas de legumes, frutas, talos e verduras descartados durante a preparação.	60%
Pós-consumo	Restos de alimentos não consumidos (arroz, feijão, carnes) deixados nos pratos ou cubas.	35%
Resíduos Restritos	Ossos grandes, caroços duros, excesso de gordura e borra de café (acima do limite).	5%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A caracterização qualitativa também identificou os materiais com restrição de descarte em biodigestores, citados acima como "Resíduos Restritos", que demandam um processo de segregação prévia na fonte para garantir a eficiência do equipamento.

Quanto à dinâmica de geração, observa-se uma sazonalidade relevante atrelada ao ritmo operacional da indústria. A geração é estável durante os dias úteis (segunda a sexta-feira), quando o efetivo administrativo e operacional está completo. Aos finais de semana e feriados, nota-se uma redução significativa no volume, restrito às equipes de turno. Em contrapartida, conforme mencionado na análise técnica, ocorrem períodos críticos denominados "Paradas Gerais" de manutenção. Nesses eventos, o número de colaboradores na planta aumenta exponencialmente, gerando picos de resíduos que exigem capacidade de processamento excedente ou gestão pontual diferenciada.

A seguir foi realizada a quantificação com base nos Manifestos de Transporte de Resíduos (MTRs) do ano de 2024, determinou-se que a geração média de resíduos alimentares totaliza 277,73 kg por dia (sendo 217,88 kg/dia da Unidade A e 59,85 kg/dia da Unidade B) conforme tabela 1, posteriormente esses dados serão utilizados para definir qual o tipo de biodigestor será escolhido, com base em sua capacidade.

Tabela 1 - Geração de Resíduos Orgânicos

<b>Unidade</b>	<b>kg/dia</b>
Unidade A	217,88
Unidade B	59,85
<b>Total</b>	<b>277,73</b>

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

## 5.2 Análise da Gestão Atual e Custos Associados

Atualmente, o gerenciamento dos resíduos orgânicos de ambas as unidades é realizado de forma terceirizada e centralizada. O processo se inicia com o armazenamento temporário dos resíduos em câmaras frias. A coleta ocorre três vezes por semana por meio de um caminhão compactador. A logística deste processo exige a pesagem do veículo na entrada e na saída da planta para a determinação do peso exato do resíduo, etapa que demanda a emissão de um *ticket* de pesagem com o apoio da equipe de faturamento. Este *ticket*, por sua vez, é a base para a emissão do Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR).

Além da complexidade burocrática, a operação envolve o tráfego de mais um veículo de grande porte dentro da planta e a alocação de colaboradores responsáveis pelo acompanhamento da coleta. O material é então transportado para destinação final em um aterro sanitário licenciado e homologado pela equipe de engenharia ambiental da empresa. A complexidade logística e documental deste processo é ilustrada na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma visual do processo atual de gestão de resíduos orgânicos

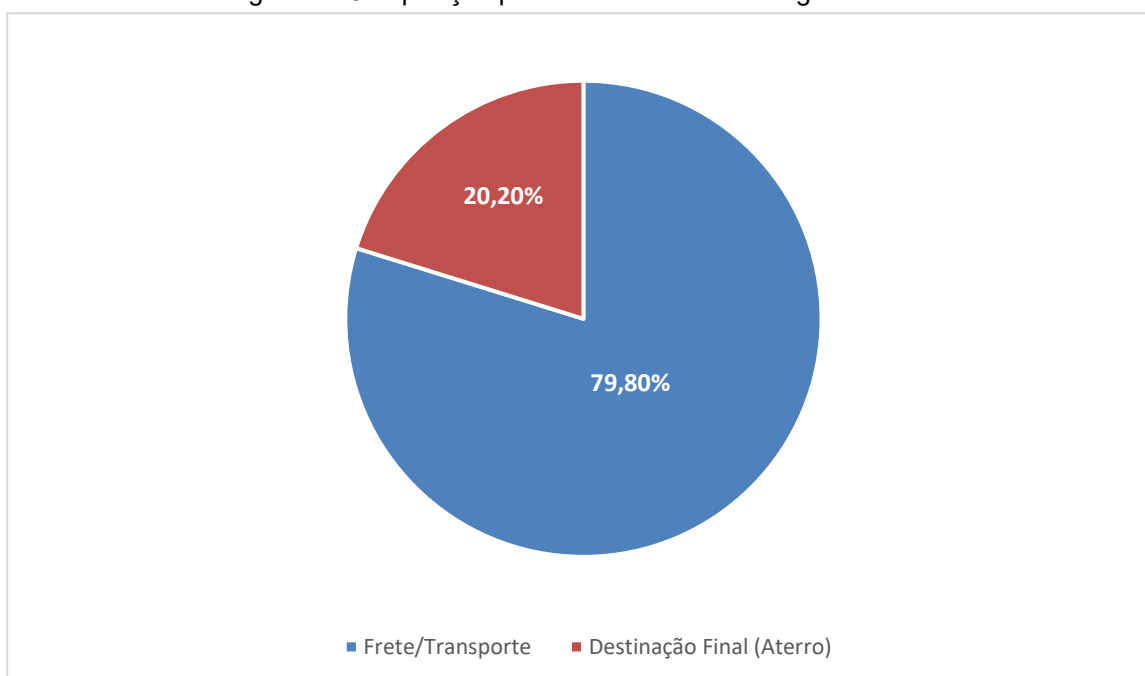


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Embora esta prática esteja em conformidade com a legislação e siga um processo de validação interna, ela representa a opção de menor prioridade na hierarquia de gestão de resíduos estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010).

Levantou-se o histórico de despesas para a análise de custos deste modelo, compreendendo os custos de destinação e de frete dos últimos três anos. A análise revelou um custo total acumulado de R\$ 313.044,08 no período, resultando em uma média mensal de R\$ 8.695,67. Para melhor compreensão da estrutura de gastos, foi elaborada uma análise percentual, apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Composição percentual dos custos da gestão atual



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Como evidencia o gráfico, o transporte (frete) representa a maior parcela dos custos, correspondendo a aproximadamente 79,8% do total, enquanto a taxa de destinação final (aterro) representa apenas 20,2%. Isso demonstra que o principal ofensor financeiro do modelo atual não é o tratamento do resíduo em si, mas sim a logística necessária para removê-lo da planta. A Tabela 2 detalha os valores absolutos desta gestão.

Tabela 2 - Custos da Gestão Atual de Resíduos

Custos	Unidade A e B	Gasto mensal - Destinação atual
Destinação	R\$ 63.365,66	R\$ 8.695,67
Frete	R\$ 249.678,42	

Fonte: Dados da pesquisa (2025)

Este cenário, caracterizado por um alto custo operacional, complexidade logística e um modelo de descarte com maior impacto ambiental, fundamenta a análise de viabilidade de alternativas tecnológicas.

### 5.3 Proposta de Implementação do Biodigestor: Viabilidade Técnica

A análise de viabilidade técnica foi realizada a partir da avaliação detalhada das propostas oficiais de dois fornecedores especializados (designados como Fornecedor A e Fornecedor B) e dos resultados de uma visita técnica para inspecionar os locais de instalação. A tecnologia central proposta envolve biodigestores anaeróbios compactos, projetados para o tratamento *on-site* (no local) de resíduos orgânicos. A Figura 5 ilustra o tipo de equipamento considerado neste estudo, servindo como referência visual para a análise das propostas e do princípio de funcionamento detalhados nas subseções seguintes.

Figura 5 - Exemplo de biodigestor anaeróbio compacto para resíduos alimentares



Fonte: POWER KNOT. LFC Biodigestor. Disponível em: [LFC biodigestor - Power Knot](#). Acesso em: 24 out. 2025.

Nota: Imagem meramente ilustrativa, representando tecnologia similar à cotada no estudo.

### 5.3.1 Análise Comparativa das Propostas Técnicas

Ambos os fornecedores propuseram uma abordagem descentralizada, com a instalação de um biodigestor em cada unidade (A e B), porém com filosofias de dimensionamento distintas:

- **Proposta do Fornecedor A:** Baseou-se em um dimensionamento justo, alinhado à geração atual. Para a Unidade A (217,88 kg/dia), foi indicado um equipamento com capacidade de 250 kg/dia e para a Unidade B (59,85 kg/dia), um modelo de 85 kg/dia.

- **Proposta do Fornecedor B:** Apresentou uma proposta com equipamentos superdimensionados. Para a Unidade A, foi cotado um modelo de 450 kg/dia, e para a Unidade B, um de 150 kg/dia.

A comparação revela um trade-off estratégico: a proposta do Fornecedor A é mais eficiente para o cenário atual, enquanto a do Fornecedor B oferece maior flexibilidade para uma eventual expansão das operações, o que ocorre em períodos de paradas gerais da planta, nos quais o número de colaboradores aumenta exponencialmente.

A escolha por analisar apenas dois fornecedores foi baseada em critérios estratégicos e práticos. Ambos já atendem empresas próximas à região da unidade industrial, garantindo maior agilidade no suporte técnico, menor custo logístico e experiência comprovada em soluções similares. Embora existam outros fornecedores viáveis no mercado, sua inclusão foi limitada por fatores como distância geográfica, ausência de histórico de fornecimento para projetos equivalentes e prazos incompatíveis com o cronograma do estudo.

Para facilitar a visualização das diferenças e semelhanças entre as ofertas, o Quadro 2 sintetiza os principais critérios técnicos, operacionais e comerciais das propostas analisadas.

Quadro 2 - Síntese Comparativa das Propostas Técnicas

<b>Critério</b>	<b>Fornecedor A</b>	<b>Fornecedor B</b>
Estratégia de Dimensionamento	Justo (Alinhado à demanda atual)	Superdimensionado (Foco em expansão)
Capacidade - Unidade A	250 kg/dia	450 kg/dia
Capacidade - Unidade B	85 kg/dia	150 kg/dia
Tecnologia	Biodigestão Anaeróbia On-site (Fluxo Contínuo)	
Material do Equipamento	Aço Inoxidável Industrial	
Serviços Inclusos	Treinamento, Manutenção Preventiva e Corretiva Mensal	
Modelo de Contratação	Locação com Taxa de Instalação	Locação Pura (Sem taxa de adesão)
Investimento Inicial (CAPEX)	R\$ 17.000,00	R\$ 0,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A comparação evidencia que, embora o Fornecedor B ofereça maior capacidade e isenção de CAPEX, o Fornecedor A apresenta um alinhamento mais preciso com a geração real de resíduos (277 kg/dia), evitando a ociosidade do equipamento e, como será demonstrado na análise econômica, resultando em um custo operacional (OPEX) significativamente menor.

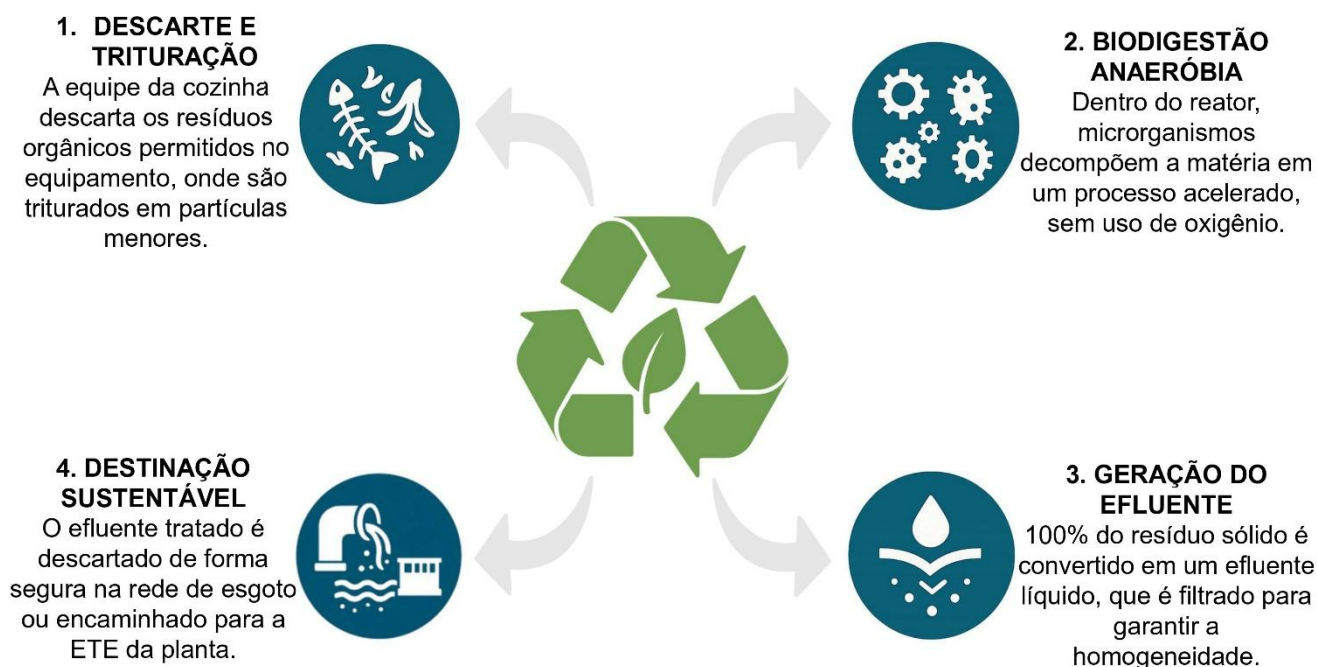
### 5.3.2 Princípio de Funcionamento da Tecnologia

Os biodigestores anaeróbios de fluxo contínuo cotados por ambos os fornecedores operam com o mesmo princípio tecnológico: a decomposição da matéria orgânica por microrganismos na ausência de oxigênio. Este processo gera dois subprodutos principais: um efluente líquido estabilizado e o biogás (uma mistura de gases rica em metano).

Embora a geração de biogás represente um potencial de aproveitamento energético, o escopo deste estudo foi deliberadamente focado na viabilidade da eliminação do resíduo sólido orgânico através de sua conversão em efluente líquido. A quantificação e a análise da viabilidade de aproveitamento energético do biogás constituiriam um projeto de engenharia à parte, de menor impacto imediato comparado à resolução do descarte do resíduo. Por essa razão, este tema é endereçado como uma oportunidade para trabalhos futuros na Conclusão.

O fluxo de tratamento do sólido, que é o foco deste trabalho, ocorre em quatro etapas principais, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - O Ciclo do Resíduo Orgânico no Biodigestor



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

É importante notar que a Figura 6 representa um ciclo onde a etapa de trituração é fundamental para aumentar a eficiência da biodigestão. O ponto de maior relevância é a conversão física do resíduo sólido em efluente líquido (Etapa 3), eliminando a logística de descarte de sólidos. Contudo, cabe ressaltar que este efluente gerado (digestato) é rico em matéria orgânica parcialmente estabilizada e nutrientes minerais.

Portanto, para assegurar a conformidade ambiental e a integridade da ETE receptora, recomenda-se a realização periódica de análises de parâmetros físico-químicos, tais como Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Nitrogênio, Sólidos e pH (cf. Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019).

### 5.3.3 Requisitos de Instalação e Adequações

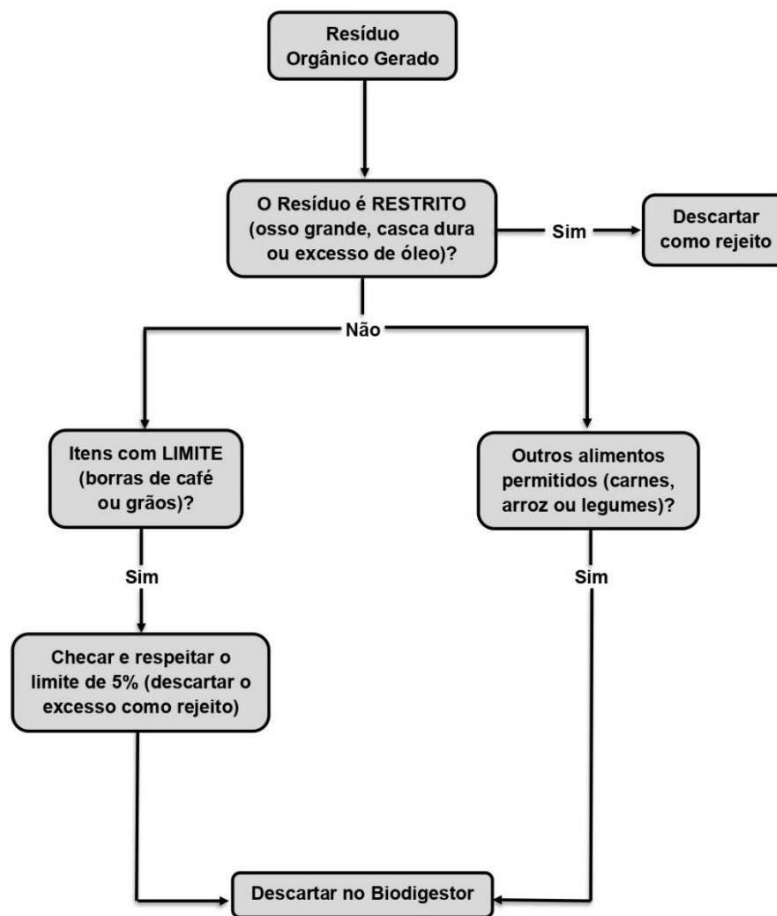
Foi realizada uma visita técnica por um dos fornecedores para verificar as condições de instalação nas duas cozinhas. O relatório da visita apontou a necessidade de algumas adequações de infraestrutura para viabilizar o projeto:

- **Localização:** Definição de uma área coberta em cada unidade, próxima à cozinha, para abrigar o equipamento e permitir a circulação segura dos operadores.
- **Infraestrutura Civil:** Construção de uma base de alvenaria nivelada para suportar o peso do biodigestor e garantir sua estabilidade.
- **Pontos de Utilidades:** Instalação de um ponto de energia elétrica (220V), um ponto de fornecimento de água e um ponto de drenagem em cada local de instalação.
- **Sistema de Drenagem:** Conexão da saída de efluente do biodigestor a uma caixa de gordura antes do descarte na rede de esgoto, conforme especificação do fabricante.
- **Estimativa de Custos de Adequação:** As adequações de infraestrutura descritas (construção de base de alvenaria, puxada de pontos elétricos e hidráulicos) são intervenções de baixa complexidade. Estima-se um custo adicional aproximado de R\$ 3.000,00 para a execução destas obras em ambas as unidades (material e mão de obra). Este valor deve ser considerado como um custo complementar ao investimento (CAPEX) do equipamento.

### 5.3.4 Análise de Viabilidade Técnica e Operacional

A implementação da tecnologia altera a rotina da equipe e depende de novos procedimentos. O principal deles é a correta segregação dos resíduos na fonte. Para garantir que apenas os materiais permitidos sejam descartados no equipamento, a equipe da cozinha deve seguir um processo de decisão, detalhado na Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma do processo de descarte de resíduos



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Fica evidente, através do fluxograma, que o sucesso da operação não depende apenas da eficiência do equipamento, mas de um rigoroso procedimento de segregação na fonte. As restrições a itens como ossos grandes e o limite para café (5%) são os pontos mais críticos do processo, demandando atenção especial durante o treinamento da equipe para garantir a integridade e a performance do biodigestor.

As propostas dos Fornecedores se destacam por incluir no contrato de serviço os seguintes itens, que mitigam os riscos operacionais:

- **Treinamento da Equipe:** Ambos os fornecedores se responsabilizam por ministrar treinamentos iniciais e de reciclagem para a equipe das cozinhas.
- **Manutenção Preventiva e Corretiva:** O contrato de locação contempla visitas periódicas de técnicos especializados. A frequência recomendada para manutenção preventiva é mensal, garantindo a verificação de sensores, sistemas de trituração e a reposição de microrganismos/enzimas quando necessário.

Vale ressaltar que o equipamento, fabricado em aço inoxidável de grau industrial, possui uma vida útil estimada superior a 10 anos em condições normais de operação. Essa alta durabilidade, aliada à garantia de manutenção inclusa no serviço mensal, assegura a continuidade da operação a longo prazo sem custos imprevistos de reposição de ativos para a empresa.

Diante do exposto, conclui-se que a implementação de biodigestores, conforme as duas propostas, é tecnicamente viável. As soluções são tecnologicamente similares e operacionalmente robustas, pois incluem o suporte necessário de treinamento e manutenção. A escolha entre elas será, portanto, fundamentada na análise econômica e na decisão estratégica entre um investimento otimizado para o presente (Fornecedor A) e um preparado para o futuro (Fornecedor B).

#### **5.4 Análise da Viabilidade Econômica**

A análise de viabilidade econômica foi realizada comparando o custo total em um horizonte temporal fixo de três anos (36 meses). Este período foi definido para alinhar a análise à duração do contrato de locação do serviço proposto pelos fornecedores, permitindo uma comparação direta e equitativa entre as alternativas de biodigestão e o cenário base (aterro).

É importante ressaltar que, por se tratar de uma modalidade de contrato de locação e prestação de serviços (Opex puro), e não da aquisição de um ativo imobilizado, não foi considerada a depreciação do equipamento na análise financeira, uma vez que o ativo não entra no balanço patrimonial da empresa contratante.

A Tabela 3 consolida os dados financeiros de cada cenário. Para o cálculo dos custos operacionais (OPEX), considerou-se estritamente o valor mensal do contrato de locação, que já engloba a manutenção preventiva e corretiva. Custos indiretos, tais como consumo de energia elétrica, água e mão de obra operacional, foram excluídos da análise comparativa sob as seguintes justificativas:

- **Mão de Obra:** A operação do equipamento é automatizada e realizada pela própria equipe de facilities ou cozinha já existente, integrada à rotina de descarte atual, não demandando novas contratações ou horas extras significativas.

- **Energia e Utilidades:** O consumo energético dos equipamentos compactos é considerado marginal frente ao custo total da operação e, em uma análise conservadora, é compensado pela eliminação dos custos ocultos da gestão atual (como a energia das câmaras frias para armazenamento de resíduos e a água para higienização de bombonas e áreas de expurgo).

- **Manutenção:** Os custos de manutenção de peças e serviços especializados estão integralmente cobertos pelo contrato de locação proposto.

Tabela 3 - Análise Comparativa de Custos

Descrição	Cenário Atual	Proposta Fornecedor	Proposta Fornecedor
	(Aterro)	A	B
Custo Mensal (OPEX)	R\$8.695,67	R\$ 7.100,00 <sup>1</sup>	R\$ 10.565,90 <sup>2</sup>
Custo de Instalação (CAPEX)	R\$0,00	R\$ 17.000,00 <sup>3</sup>	R\$0,00*
Custo Total em 36 Meses	R\$313.044,12	R\$272.600,00	R\$380.372,40

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

<sup>1</sup> Soma dos custos mensais da Unidade A (R\$ 3.900,00) e Unidade B (R\$ 3.200,00).

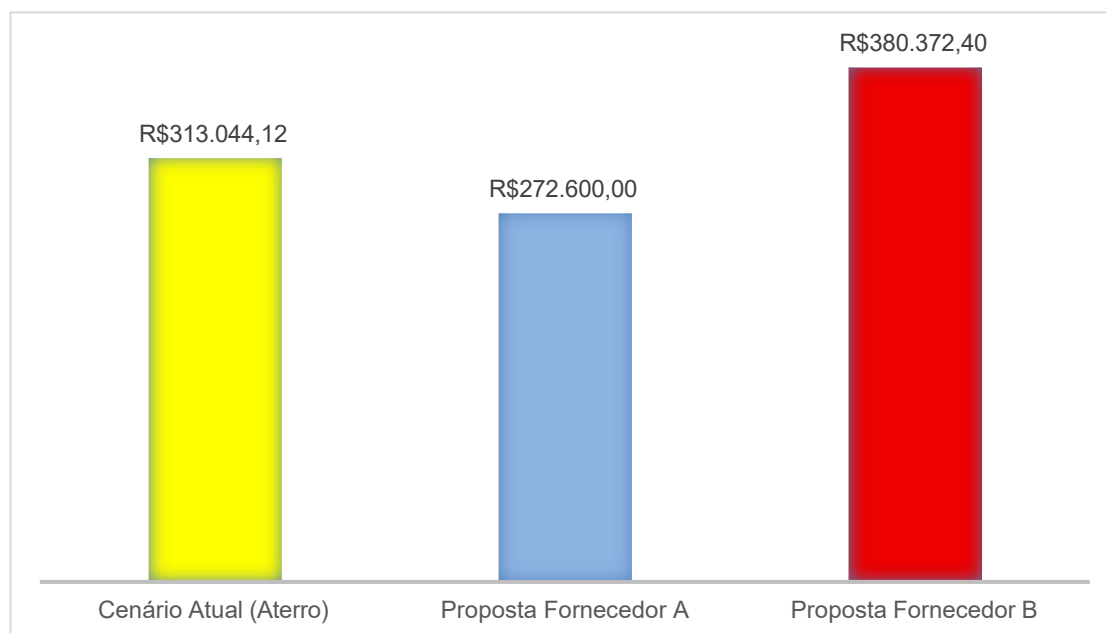
<sup>2</sup> Soma dos custos mensais da Unidade A (R\$ 5.793,10) e Unidade B (R\$ 4.772,80).

<sup>3</sup> Soma dos custos de instalação para as duas unidades (R\$ 8.500,00 cada).

\* Proposta do Fornecedor B não possui custo de instalação (CAPEX).

A Tabela 3 evidencia que a proposta do Fornecedor B, com um custo total de R\$ 380.372,40, é significativamente mais onerosa que a gestão atual. Em contrapartida, a proposta do Fornecedor A, com um custo total de R\$ 272.600,00, aponta para uma economia substancial. Essa disparidade de custos é ilustrada de forma ainda mais clara na Figura 8.

Figura 8 - Comparativo de Custo Total em 36 meses



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O gráfico de barras demonstra visualmente a vantagem competitiva da proposta do Fornecedor A, que se posiciona como a única alternativa com potencial de redução de custos. A análise a seguir foca, portanto, no retorno do investimento desta proposta.

A proposta do Fornecedor A, quando comparada diretamente com o custo da gestão atual para o aterro, demonstra ser economicamente vantajosa. Embora exija um investimento inicial de R\$ 17.000,00, a proposta reduz significativamente o custo operacional mensal. A economia recorrente é calculada da seguinte forma (Equação 1):

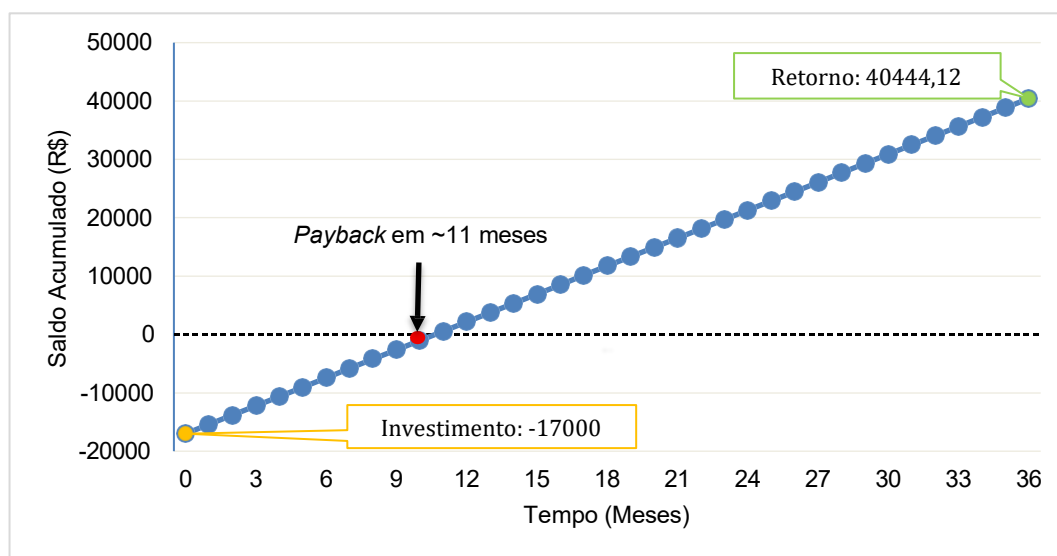
$$R\$ 8.695,67 \text{ (Custo Mensal Atual)} - R\$ 7.100,00 \text{ (Custo Mensal Fornecedor A)} = R\$ 1.595,67 \text{ (Economia Mensal)} \quad \text{(Equação 1)}$$

Com base nessa economia, o tempo de retorno do investimento (*payback*) é calculado dividindo-se o investimento inicial pela economia mensal gerada (Equação 2):

$$\frac{(R\$ 17.000,00 \text{ (Investimento)})}{(R\$ 1.595,67 \text{ (Economia Mensal)})} = 10,65 \text{ meses} \quad \text{(Equação 2)}$$

Desta forma, o investimento é recuperado em aproximadamente 11 meses. A Figura 9 detalha a evolução do saldo acumulado deste investimento ao longo do contrato.

Figura 9 - Análise de Payback do Investimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A linha na Figura 9 parte do valor negativo do investimento e ascende mensalmente com a economia gerada. O cruzamento com o eixo zero, pouco antes do 11º mês, representa o exato ponto de *payback*, momento a partir do qual o projeto passa a gerar lucro líquido para a empresa. Ao final dos 36 meses, a economia acumulada ultrapassa os R\$ 40.000,00.

A análise dos dados, portanto, indica que a proposta do Fornecedor A é a única alternativa que apresenta viabilidade econômica. O rápido retorno do investimento, inferior a um ano, somado à economia de mais de R\$ 40.000,00 ao longo do contrato, validam a proposta sob a ótica financeira. Esta conclusão parcial será complementada na seção seguinte pela análise dos impactos ambientais e sociais da mesma proposta.

## 5.5 Principais Impactos Ambientais e Sociais da Proposta

Além da comprovada viabilidade econômica, a adoção da proposta do Fornecedor A gera uma série de impactos positivos iniciais de ordem ambiental, social e operacional, que reforçam o valor estratégico do investimento e alinham a empresa aos princípios ESG (Ambiental, Social e Governança). Cabe ressaltar que esta seção foca na identificação e descrição qualitativa desses impactos, não constituindo uma análise aprofundada de viabilidade ambiental, que demandaria ferramentas específicas como a Avaliação de Ciclo de Vida.

### 5.5.1 Impactos Ambientais

Os benefícios ambientais da implementação dos biodigestores vão além da conformidade legal, gerando resultados quantificáveis de mitigação de impacto. Para facilitar a visualização, o Quadro 3 sintetiza os principais impactos identificados e seus respectivos efeitos esperados.

Quadro 3 - Síntese dos Impactos Ambientais e Efeitos Esperados

Impacto Ambiental	Efeito Esperado / Benefício
Desvio de Aterro	Eliminação do envio de 73,3 toneladas/ano de resíduos orgânicos para aterro sanitário, atendendo ao topo da hierarquia da PNRS.
Redução de Emissões (GEE)	Mitigação da geração de metano (CH <sub>4</sub> ) pela decomposição anaeróbia não controlada. Estima-se que o projeto evite a emissão de aproximadamente 125 toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente (CO <sub>2</sub> e) por ano (baseado em fatores de conversão do IPCC para resíduos alimentares).
Potencial Energético	Geração estimada de 7.330 m <sup>3</sup> de biogás/ano, representando um potencial energético bruto de aproximadamente 44 MWh/ano, disponível para futuro aproveitamento térmico ou elétrico.
Eliminação de Transporte	Supressão da coleta externa (3 vezes/semana), eliminando as emissões de CO <sub>2</sub> associadas à queima de diesel (Escopo 3) e reduzindo o tráfego de veículos pesados na planta.
Ciclo de Nutrientes	Geração de efluente líquido rico em nutrientes (digestato). Embora o foco inicial seja o descarte na ETE, o material possui alto potencial de valorização agrônômica como biofertilizante, promovendo o fechamento do ciclo de nutrientes.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise detalhada desses impactos revela a robustez da solução proposta:

- **Mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE):** Ao evitar a disposição em aterro, elimina-se a emissão fugitiva de metano. Utilizando fatores de conversão do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, estima-se que o desvio das 73,3 toneladas anuais evite a emissão de 125 tCO<sub>2</sub>e/ano (cf. IPCC, 2014).

- **Potencial Energético:** O volume de resíduos também representa uma fonte de energia. Adotando parâmetros conservadores da literatura para resíduos alimentares (produção específica de 100 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada e poder calorífico inferior de 6,0 kWh/m<sup>3</sup>), estima-se uma produção volumétrica anual de 7.330 m<sup>3</sup> de biogás. Convertido em energia, isso representa um potencial bruto de aproximadamente 43.980 kWh por ano (cf. Deublein; Steinhauser, 2011). Embora o aproveitamento energético não esteja no escopo inicial de investimento, este dado evidencia a capacidade do projeto de evoluir para uma fonte de energia renovável no futuro.

### 5.5.2 Impactos Sociais e Operacionais

A internalização do tratamento de resíduos também promove melhorias no ambiente de trabalho e na gestão da empresa:

- **Saúde e Segurança do Trabalho:** A eliminação do armazenamento de resíduos em câmaras frias e do manuseio para descarte externo reduz a exposição dos colaboradores a potenciais focos de contaminação, odores e riscos ergonômicos, melhorando a segurança e a salubridade do ambiente de trabalho.

- **Simplificação Logística e Burocrática:** O processo interno de biodigestão elimina a complexa logística de pesagem de caminhões, emissão de tickets de pesagem e de MTRs, otimizando o tempo das equipes de apoio (como a de faturamento) e simplificando a gestão de resíduos.

- **Fortalecimento da Imagem e Cultura de Sustentabilidade:** A adoção de uma tecnologia de ponta para a gestão de resíduos posiciona a empresa como uma referência em sustentabilidade no setor. Este fato fortalece a imagem da marca perante a comunidade, clientes e investidores, além de promover o engajamento e a conscientização ambiental dos próprios colaboradores, que passam a fazer parte de uma solução sustentável.

Em síntese, os impactos não-financeiros da proposta são substanciais e transformam o projeto de uma simples iniciativa de redução de custos em um avanço estratégico na jornada de sustentabilidade da empresa, materializando os princípios da Economia Circular e do Aterro Zero discutidos no Capítulo 2.

## 5.6 Análise da Alternativa: Compostagem

Para garantir uma análise abrangente, foi avaliada uma segunda alternativa tecnológica para o tratamento dos resíduos orgânicos: a compostagem industrial terceirizada. Este processo consiste na coleta dos resíduos pela empresa especializada e seu transporte para um pátio de compostagem, onde são transformados em adubo orgânico.

### 5.6.1 Análise de Viabilidade Técnica e Operacional

Do ponto de vista técnico, a compostagem é um processo biológico aeróbio controlado e consolidado para a valorização de resíduos orgânicos. A eficiência do processo depende do rigoroso controle de parâmetros como a relação Carbono/Nitrogênio (C/N), aeração e umidade, visando a higienização do material e a produção de um composto orgânico estável e rico em nutrientes (cf. Inácio; Miller, 2009).

Embora a implementação mantenha uma logística similar à atual (coleta por caminhão), a análise qualitativa revela riscos operacionais e estratégicos inerentes a este modelo terceirizado, que diferem da solução de biodigestão interna:

- **Dependência de Terceiros:** A operação fica vulnerável à disponibilidade e à solvência da empresa parceira. Interrupções no serviço de coleta (greves, quebras de frota) impactariam imediatamente a capacidade de armazenamento da cozinha.

- **Volatilidade de Custos:** Por depender de transporte rodoviário, o custo operacional está exposto à variação do preço do combustível (diesel) e de taxas de frete, dificultando a previsibilidade orçamentária a longo prazo.

- **Rastreabilidade e Certificação:** A garantia de que o resíduo foi efetivamente compostado e não desviado depende da idoneidade do fornecedor e da validade de suas licenças ambientais e certificações do produto final junto ao Ministério da Agricultura (MAPA). A perda de qualquer uma dessas certificações pelo parceiro geraria um risco de corresponsabilidade ambiental para a empresa geradora.

Portanto, embora tecnicamente viável, a compostagem apresenta uma vulnerabilidade externa maior do que o tratamento in loco.

### 5.6.2 Análise de Viabilidade Econômica

A análise de custos para a alternativa de compostagem foi realizada com base na cotação de um fornecedor especializado, considerando o mesmo volume de resíduos (73,3 toneladas/ano) e um contrato de três anos para comparação. O Quadro 4 detalha os custos envolvidos.

Quadro 4 – Análise de Custos da Compostagem

<b>Descrição</b>	<b>Custo Mensal (R\$)</b>	<b>Custo Anual (R\$)</b>	<b>Custo Total em 36 Meses</b>
Serviço de Coleta e Compostagem	10.125,00	121.500,00	364.500,00

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A análise econômica demonstra que a compostagem, apesar de ser uma alternativa ambientalmente superior ao aterro sanitário, possui um custo mensal de R\$ 10.125,00, que é superior tanto ao custo atual com o aterro (R\$ 8.695,67) quanto ao custo operacional da proposta do biodigestor do Fornecedor A (R\$ 7.100,00). Ao final de três anos, a compostagem representaria um custo total de R\$ 364.500,00, sendo R\$ 51.455,88 mais cara que a gestão atual.

Embora a compostagem seja uma solução tecnicamente viável e ambientalmente correta, sua implementação representaria um aumento nos custos operacionais da empresa, tornando-a economicamente inviável no presente cenário. Em comparação direta, a proposta do biodigestor do Fornecedor A se mostra superior, pois, além de oferecer os mesmos benefícios ambientais de valorização do resíduo, o faz com uma significativa redução de custos a médio e longo prazo.

Para consolidar a tomada de decisão, o Quadro 5 apresenta uma síntese comparativa final entre as três alternativas estudadas (Cenário Atual, Biodigestor Proposta A e Compostagem), ponderando os pilares econômico, ambiental e operacional.

Quadro 5 - Matriz Comparativa Final: Aterro vs. Biodigestor vs. Compostagem

<b>Critério</b>	<b>Cenário Atual (Aterro)</b>	<b>Alternativa 1: Compostagem</b>	<b>Alternativa 2: Biodigestor (A)</b>
Custo Total (36 meses)	R\$ 313.044	R\$ 364.500	R\$ 272.600
Viabilidade Econômica	<i>Baseline</i> (Referência)	Inviável (+16% custo)	Viável (-13% custo)
Impacto Ambiental	Negativo (Emissão de GEE e desperdício de recurso)	Positivo (Reciclagem de nutrientes)	Positivo (Reciclagem + Energia + Redução Transporte)
Risco Operacional	Baixo (Processo maduro, mas burocrático)	Médio (Dependência externa e frete)	Baixo (Interno, com manutenção inclusa)
Alinhamento ESG	Baixo	Alto	Muito Alto

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A matriz confirma que o Biodigestor (Proposta A) é a única alternativa que atinge o "ponto ótimo": maximiza o benefício ambiental (Aterro Zero e redução de emissões) enquanto minimiza o custo operacional, superando tanto a inércia do aterro quanto a alternativa da compostagem externa.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou responder à questão sobre qual a viabilidade técnica e econômica, bem como os principais impactos ambientais, da implementação de um biodigestor anaeróbio como passo inicial para a adoção do conceito de Aterro Zero. A análise dos dados e resultados apresentados nos capítulos anteriores permite concluir que a implementação da tecnologia, conforme a proposta do Fornecedor A, é não apenas viável, mas estrategicamente vantajosa para a empresa.

Os resultados demonstraram que o cenário atual de gestão dos resíduos, embora em conformidade com a legislação, representa a opção de menor prioridade na hierarquia da Política Nacional de Resíduos Sólidos e acarreta um custo operacional anual superior a R\$ 100.000,00, além de apresentar complexidades logísticas. A análise de alternativas revelou que a implementação de biodigestores é tecnicamente viável, com duas propostas comerciais distintas: uma dimensionada para a demanda atual (Fornecedor A) e outra superdimensionada para expansão futura (Fornecedor B).

A análise econômica, no entanto, foi conclusiva ao apontar a proposta do Fornecedor A como a única economicamente viável. Com um investimento inicial de R\$ 17.000,00 e uma redução nos custos operacionais mensais, a solução oferece um tempo de retorno do investimento (*payback*) de aproximadamente 11 meses e uma economia total superior a R\$ 40.000,00 ao final de três anos. Em contrapartida, a proposta do Fornecedor B e a alternativa de compostagem se mostraram economicamente inviáveis, representando um aumento de custos para a empresa.

Diante do exposto, este estudo conclui que a implementação do biodigestor anaeróbio, conforme a proposta do Fornecedor A, é altamente viável sob as óticas técnica, econômica e ambiental. A tecnologia não apenas soluciona a questão do descarte de resíduos orgânicos de forma mais sustentável, mas também gera uma significativa redução de custos operacionais. Adicionalmente, o projeto acarreta benefícios ambientais relevantes, como o desvio de 73,3 toneladas anuais de resíduos de aterros e a consequente redução na emissão de gases de efeito estufa, e impactos sociais positivos, como a melhoria da segurança e salubridade no ambiente de trabalho e a simplificação de processos logísticos.

Este trabalho contribui para a literatura ao apresentar um estudo de caso detalhado, com dados reais de viabilidade, que pode servir como referência para outras indústrias que buscam implementar soluções alinhadas à Economia Circular e ao conceito de Aterro Zero.

Cabe ressaltar que este estudo possui limitações inerentes à sua metodologia. Por se tratar de um estudo de caso único, focado em uma indústria específica do setor químico e petroquímico, os resultados e a viabilidade econômica podem não ser diretamente generalizáveis para outras organizações com diferentes volumes de geração ou estruturas de custo. Adicionalmente, a análise financeira foi projetada com base em orçamentos e propostas comerciais, estando sujeita a variações nos custos reais de implantação e operação. Por fim, como justificado anteriormente, o escopo do trabalho foi delimitado à viabilidade da eliminação do resíduo sólido, não incluindo a análise de aproveitamento do biogás.

Com base nos resultados e limitações identificados, emergem oportunidades para investigações futuras. Recomenda-se, primeiramente, um aprofundamento na análise do biogás gerado pelo processo, focando na sua quantificação, caracterização e viabilidade técnico-econômica do seu aproveitamento energético, complementando os resultados aqui apresentados. Sugere-se, ainda, a realização de um estudo de acompanhamento após a implantação do projeto para validar as projeções financeiras e o desempenho operacional em condições reais. Por fim, futuros trabalhos poderiam explorar a aplicação de metodologias similares para outras correntes de resíduos da empresa, avançando progressivamente em direção à meta de Aterro Zero.

## REFERÊNCIAS

- ABREMA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024**. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, 2024. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama>. Acesso em: 24 nov. 2025.
- ANDRADE, R. M. C. B. de. A universalização da temática ambiental e a sua inclusão nas relações internacionais. **O Cosmopolítico**, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 98-110, 2018.
- ARAÚJO, Samara Mirelle Silva de; SILVA, Mateus Lucas da; MEDEIROS, Isabelly Cristina Dantas de; SILVA, Eliziany Barbosa da; SOUZA NETO, Pio Marinheiro de. **Análise bibliográfica: gestão de resíduos orgânicos em indústrias de polpas de frutas**. Revista de Ensino, Pesquisa e Extensão em Gestão, UFRN, 2025. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revenspesextgestao/article/view/40452>. Acesso em: 24 nov. 2025.
- BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2011.
- BRASIL. **Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 2 ago. 2010.
- CAMARA, L. M. de A. Uma base para os pilares ESG: indicadores e regulamentação com ferramentas para superar o greenwashing. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE DIREITO E SUSTENTABILIDADE, 5., 2021, [S. l.]. **Anais...** [S. l.: s. n.], 2021. p. 99-113.
- CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTKE, B. H. **Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. 11. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). **Guia Técnico Ambiental da Indústria Petroquímica**. São Paulo: CETESB, 2008. Disponível em: [guiaambiental\\_efeito.indd](http://guiaambiental_efeito.indd). Acesso em: 24 out. 2025.
- CHERNICHARO, C. A. de L. **Reatores Anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- COSTA, L. I. S.; SALES, D. S.; CORREIA, V. G.; SALES, C. M. R.; NUNES, C. H.; CHAVES, G. C. O aterro zero como contribuição à agenda 2030: um estudo de caso em uma empresa de óleo e gás no município de Rio das Ostras – RJ. **Revista Caderno Pedagógico**, Curitiba, v. 21, n. 3, p. 01-22, 2024.
- CRESWELL, J. W.; PLANO CLARK, V. L. **Designing and Conducting Mixed Methods Research**. 3. ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2018.
- DAL-FARRA, R. A.; FETTERS, M. D. **Recent Advances in Mixed Methods Research: Integration and Interpretation**. Journal of Mixed Methods Research, v. 11, n. 3, p. 291-307, 2017.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: an introduction**. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2011.

DILEEP, M. R. Tourism and waste management: A review of implementation of "zero waste" at Kovalam. **Asia Pacific Journal of Tourism Research**, [S. l.], v. 12, n. 4, 2007.

DUGONSKI, F. C. V.; BONDE, T.; ALCÂNTARA, E. M. S.; MIECOANSKI, L. F.; FRANKENBERGER, F.; TUMELERO, C. Economia Circular e Total Waste Management: aterro zero em um parque turístico brasileiro. **RISUS – Journal on Innovation and Sustainability**, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 138-151, maio/jun. 2024.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy: economic and business rationale for an accelerated transition**. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2015.

FUNDAÇÃO ELLEN MACARTHUR. **Diagrama de sistemas de economia circular**. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, fev. 2019. 1 infográfico. Acesso em: 24 out. 2025.

GALVÃO, M. C. B.; PLUYE, P.; RICARTE, I. L. M. **Métodos mistos: conceitos, construção e critérios de avaliação**. Revista Brasileira de Educação Médica, v. 44, n. 4, p. e123, 2020.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos De Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, L. P.; KOHL, C. A.; SOUZA, C. L. L.; REMPEL, N. Avaliação ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S. l.], v. 20, n. 3, p. 449-462, 2015.

GOULART, E. G.; WOLF, M. R.; ESPINOSA, D. C. R. Compostagem como alternativa para gestão de resíduos orgânicos de restaurante industrial. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 1, p. 197-216, jan./mar. 2019.

INÁCIO, C. T.; MILLER, P. R. M. **Compostagem: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 141 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Building a framework for a sustainable future**. Genebra, 2020. Disponível em: <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/news/2020/01/Ref2469.html>. Acesso em: 25 ago. 2025.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014.

KAZA, S.; YAO, L. C.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington, DC: World Bank, 2018.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. In: KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. (Org.). **Apostila do Curso de Tratamento de Dejetos e Produção de Biogás no Meio Rural**. Concórdia, SC: Embrapa Suínos e Aves, 2019. cap. 1, p. 11-30.

OLIVEIRA, A. L. S. **O estudo de caso e os métodos mistos: utilização de técnicas quantitativas em complementaridade à pesquisa qualitativa**. Revista Tópicos, [S.I.], 25 jun. 2024. DOI: 10.5281/zenodo.12538961. Disponível em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/o-estudo-de-caso-e-os-metodos-mistos-utilizacao-de-tecnicas-quantitativas-em-complementaridade-a-pesquisa-qualitativa>. Acesso em: 25 nov. 2025.

OLIVEIRA, L. H.; GALBIERI, R.; CUNHA, C. A. G. G. Geração e caracterização de resíduos sólidos em restaurante universitário e potencial de reciclagem. **Revista Ambiente & Água**, v. 7, n. 3, p. 190-205, 2012.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Gestão dos resíduos sólidos é chave para desenvolvimento sustentável da América Latina**. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/175171-gestao-dos-residuos-solidos-e-chave-para-desenvolvimento-sustentavel-da-america-latina>. Acesso em: 02 ago. 2025.

POWER KNOT. **LFC Biodigester**. 2025. Disponível em: <https://powerknot.com/lfc/>. Acesso em: 24 out. 2025.

SANTOS, V. M.; BARROS, R. T. V.; TIAGO FILHO, G. L. Avaliação da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos de restaurante universitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 347-356, jul./set. 2009.

SARKAR, B.; DEBNATH, A.; CHIU, A. S. F.; AHMED, W. Circular economy-driven two-stage supply chain management for nullifying waste. **Journal of Cleaner Production**, [S. I.], v. 339, article 130513, 2022.

SPEECE, Richard E. **Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters**. Nashville: Archae Press, 1996. 394 p.

SEURING, S.; SARKIS, J.; MÜLLER, M.; RAO, P. Sustainability and supply chain management—an introduction to the special issue. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 15, p. 1545-1551, Oct. 2008.

SILVA, M. E.; CORAZZA, R. I. Gestão ambiental na indústria do petróleo e petroquímica. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 8, n. 1, p. 217-243, jan./abr. 2012.

SOUZA, O. T. de; CHAVES, I. R.; ALVIM, A. M. Reciclagem e gestão de resíduos sólidos como possibilidades para a geração de benefícios sociais, econômicos e ambientais. **Revista Grifos**, [S. I.], v. 24, n. 38/39, p. 51-70, 2015.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Waste and Climate Change -**

**Global Trends and Strategy Framework.** Nairobi, 2017.

VAN EWIJK, S.; STEGEMANN, J. A. Limitations of the waste hierarchy for achieving absolute reductions in material throughput. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 132, 2016.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

ZERO WASTE INTERNATIONAL ALLIANCE. **Zero Waste Definition.** 2018. Disponível em: <https://zwia.org/zero-waste-definition/>. Acesso em: 01 set. 2025.