

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO

BRENDA NATÁLIA PEREIRA

**INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTOS COMO ESTRATÉGIA PARA A RESILIÊNCIA
URBANA EM FACE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

São Leopoldo
2025

BRENDA NATÁLIA PEREIRA

**INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTOS COMO ESTRATÉGIA PARA A RESILIÊNCIA
URBANA EM FACE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientadora: Dra. Luciana Paulo Gomes

São Leopoldo

2025

P436i Pereira, Brenda Natália.
Integração de sistemas de produção de biogás em estações de tratamento de esgotos com estratégia para a resiliência urbana em face às mudanças climáticas / Brenda Natália Pereira. – 2025.
139 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.
“Orientadora: Profa. Dra. Luciana Paulo Gomes”

1. Biogás. 2. Digestão anaeróbia. 3. Estação de tratamento de esgoto. 4. Resiliência urbana. I. Título.

CDU 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Silvana Dornelles Studzinski – CRB 10/2524)

AGRADECIMENTOS À CAPES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

AGRADECIMENTOS

O capítulo de agradecimentos é um capítulo importante para refletirmos quem esteve ao nosso lado durante a trajetória do mestrado. É através dele que pensamos em todas as orações que fizemos a Deus pedindo forças, todas as pessoas presentes e lembramos de todas as noites e madrugadas frias que passamos acordados para que pudéssemos terminar a dissertação, a jornada não é fácil, mas a promessa de que contribuiremos com as decisões futuras da sociedade nos lembra que talvez este documento seja maior que nós mesmos.

Dito isto, quero agradecer a Deus por ter me dado forças, persistência e coragem para terminar esta dissertação tão falada por mim. Acredito que tenha sido ele que me encorajou nas madrugadas sozinhas, silenciosas e frias que fizeram render esta dissertação.

Aos meus pais, Derci e Edson Pereira, sem seu amor, carinho e apoio eu nunca teria vivido nada do que eu vivi e nunca teria chegado até aqui. Por vocês eu desejo ser uma pessoa melhor e espero retribuir um pouco de tudo que vocês me proporcionam, meu amor incondicional é por vocês. Aos meus irmãos, Valentina e Arthur Pereira, ao meu melhor amigo Lowie, por estarem presente e me trazerem alegrias nos momentos de angústia.

Agradeço a todos os meus amigos que através de gestos, palavras e chocolates contribuíram com todas as etapas desta escrita e mais ainda por entenderem a minha ausência e muitas vezes me darem acalento e sabedoria durante a escrita desta dissertação. Obrigada principalmente a Gislene, Lara, Igor, Renata e Leonardo e a todos que contribuíram com toda e qualquer forma de carinho, eu amo vocês.

Aos meus avós, Vilma e Geraldo Pereira e Brandina Furquin (*in memoriam*) e Tomé, que com certeza queriam estar junto comigo comemorando esta conclusão, por mais que talvez não saibam a importância deste trabalho, mas nunca duvidariam que ele se concretizaria.

À minha psicóloga, Thielsen Dumke, pela profissional ímpar que é, pelo auxílio na organização da minha vida e guia de emoções.

A minha orientadora Dra. Luciana Paulo Gomes, pela colaboração e paciência comigo e com este trabalho.

Aos meus familiares e parentes, que entenderam minha ausência, me incentivaram através de pequenos detalhes e contribuem diariamente com o meu crescimento pessoal.

As empresas de Saneamento que me mandaram os dados para a realização deste trabalho.

Agradeço a todos e a cada um que se fez presente nesta trajetória e que contribuiu de qualquer maneira para este trabalho, minha sincera gratidão.

RESUMO

As projeções populacionais para 2054 indicam um total de 9,9 bilhões de pessoas no planeta, sendo que mais da metade estará concentrada em áreas urbanas. Esse cenário impõe desafios à infraestrutura das cidades, exigindo soluções inovadoras e sustentáveis para atender à crescente demanda em espaços limitados. As Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) desempenham papel essencial nesse contexto e, quando utilizam processos anaeróbios, geram metano como subproduto. Esse gás possui potencial de aquecimento global aproximadamente 28 vezes superior ao dióxido de carbono, mas pode ser convertido em energia térmica, elétrica, mecânica ou combustível veicular. O aproveitamento do metano em ETEs representa uma alternativa para geração descentralizada de energia renovável, contribuindo para a redução de emissões de gases de efeito estufa, economia circular, diminuição de odores e viabilidade ambiental e financeira desses empreendimentos. Este trabalho teve como objetivo estimar o potencial de geração de biogás em quatro ETEs localizadas no Rio Grande do Sul — Morada dos Eucaliptos (Novo Hamburgo), Vicentina (São Leopoldo), Tega (Caxias do Sul) e Serraria (Porto Alegre) — além de calcular a emissão evitada de gases de efeito estufa e a energia elétrica passível de ser gerada a partir do metano. Os resultados mostraram variações entre as ETEs, com destaque para a ETE Serraria, que obteve a maior produção específica de metano por quilograma de DQO removida ($0,232 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$) e maior capacidade de geração energética ($17.057,14 \text{ kWh/dia}$). A ETE Tega apresentou valores negativos de metano aproveitável devido à diluição do esgoto pelo sistema de drenagem pluvial. A estimativa de emissão evitada mostrou reduções expressivas, especialmente na ETE Serraria, que apresentou redução líquida de mais de 51 mil toneladas de CO_2 equivalente por ano. Portanto, o aproveitamento energético do metano pode tornar as ETEs menos dependentes da rede elétrica e mais preparadas para responder a eventos extremos e instabilidades, contribuindo para a resiliência urbana e se alinhando aos compromissos de sustentabilidade e adaptação climática.

Palavras-chave: biogás; estação de tratamento de esgoto; digestão anaeróbia; resiliência urbana.

ABSTRACT

Population projections for 2054 estimate a total of 9.9 billion people worldwide, with more than half living in urban areas. This scenario poses challenges for urban infrastructure, requiring innovative and sustainable solutions to meet increasing demand in limited spaces. Wastewater Treatment Plants (WWTPs) play a key role in this context and, when using anaerobic processes, generate methane as a by-product. Methane has a global warming potential approximately 28 times greater than carbon dioxide, but it can be converted into thermal, electrical, mechanical energy, or vehicular fuel. The use of methane in WWTPs presents an opportunity for decentralized renewable energy generation, contributing to the reduction of greenhouse gas emissions, circular economy strategies, odor control, and the environmental and financial viability of these facilities. This study aimed to estimate the biogas generation potential of four WWTPs located in the state of Rio Grande do Sul, Brazil — Morada dos Eucaliptos (Novo Hamburgo), Vicentina (São Leopoldo), Tega (Caxias do Sul), and Serraria (Porto Alegre) — as well as to calculate the avoided emissions of greenhouse gases and the potential for electricity generation from methane. The results showed differences among the plants, with Serraria standing out for its highest specific methane production per kilogram of COD removed ($0.232 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg COD}$) and the greatest energy generation potential (17,057.14 kWh/day). The Tega plant showed negative methane values due to the dilution of wastewater by the stormwater drainage system. The estimated avoided emissions revealed considerable reductions, especially at the Serraria plant, which could achieve a net reduction of over 51,000 tons of CO_2 equivalent per year. It is concluded that the energy recovery from methane can make WWTPs less dependent on the power grid and more capable of responding to extreme events and system instabilities, contributing to urban resilience and aligning with sustainability and climate adaptation goals.

Keywords: biogas, wastewater treatment, anaerobic digestion, urban resilience.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da revisão sistemática da literatura.....	19
Figura 2- Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	22
Figura 3 - Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia	40
Figura 4 - Esquema de funcionamento de reator UASB	42
Figura 5 - ETE Vicentina	105
Figura 6 - ETE Tega	106
Figura 7 - ETE Serraria	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Revisão sistemática de literatura de mudanças climáticas	25
Quadro 2 - Interpretação mais restrita ao socioecológico de resiliência	35
Quadro 3 - Vantagens e desvantagens do tratamento anaeróbio	38
Quadro 4 - Critérios de projeto para reatores UASB tratando esgoto em países tropicais	46
Quadro 5 - Revisão sistemática de Estações de Tratamento de esgotos e Biogás ..	51
Quadro 6 - Comparativo das ETEs em estudo	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempos de detenção hidráulica recomendados para reatores UASB que tratam esgoto doméstico	43
Tabela 2 - Composição do biogás	48
Tabela 3 - Valores e percentuais de perda de metano em relação ao metano produzido.....	109
Tabela 4 - Dados operacionais ETE Morada dos Eucaliptos (n=328).....	115
Tabela 5 - Quantificação de biogás na ETE Morada dos Eucaliptos.....	115
Tabela 6 - Dados operacionais ETE Vicentina (n=317).....	118
Tabela 7 - Quantificação de biogás na ETE Vicentina	118
Tabela 8 - Dados operacionais ETE Tega (n= 46)	120
Tabela 9 - Quantificação de biogás na ETE Tega.....	121
Tabela 10 - Dados operacionais ETE Serraria (n=364).....	123
Tabela 11 - Quantificação de biogás na ETE Serraria	123
Tabela 12 - Tabela comparativa de indicadores.....	125
Tabela 13 - Emissão evitada de metano das ETEs.....	126
Tabela 14 - Potencial energético.....	128

LISTA DE SIGLAS

ABIOGÁS	Associação Brasileira do Biogás
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia elétrica
DA	Digestão Anaeróbia
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LO	Licença de Operação
LOR	Licença de Operação de Regularização
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
ODM	Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
RAFA	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SEMAE	Serviço Municipal de Água e Esgotos
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	20
2.2	RESILIÊNCIA URBANA	34
2.3	ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO	35
2.3.1	Digestão anaeróbia	38
2.3.2	Reator UASB.....	40
2.3.2.1	Dimensionamento do reator UASB.....	42
2.4	CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS	46
2.4.1	Transporte do biogás	48
2.4.2	Tratamento do biogás	49
2.4.3	Armazenamento do biogás.....	50
3.	METODOLOGIA	104
3.1	ESTUDOS DE CASOS - ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS.....	104
3.1.1	ETE MORADA DOS EUCALIPTOS.....	104
3.1.2	ETE VICENTINA	105
3.1.3	ETE TEGA	105
3.1.4	ETE SERRARIA.....	106
3.2	QUANTIFICAÇÃO DE BIOGÁS PRODUZIDO NAS ETES	107
3.3	ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE METANO EVITADA	111
3.4	POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOGÁS.....	112
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	114
4.1	QUANTIFICAÇÃO DE BIOGÁS	114
4.1.1	ETE Morada dos Eucaliptos	115
4.1.2	ETE Vicentina	117
4.1.3	ETE Tega	120
4.1.4	ETE Serraria	122
4.1.5	Comparativo das estações	125
4.2	EMISSÃO EVITADA DE GASES DO EFEITO ESTUFA	126
4.3	GERAÇÃO DE ENERGIA	127
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	130

REFERÊNCIAS132

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2024), ainda é baseada em fontes não renováveis de energia, sendo 85,3% da matriz energética mundial derivada de fontes não renováveis, principalmente em petróleo (29,5%), carvão mineral (27,2%) e gás natural (23,6%). A matriz energética brasileira apresenta uma melhora, onde 55,2% é baseada em fontes não renováveis, principalmente em petróleo (35,7%) e gás natural (10,5%). No entanto, quando se avalia a matriz elétrica brasileira, o cenário é bem diferente, com cerca de 89,2% da matriz baseada em fontes renováveis. Segundo a EPE (2024), a participação de fontes renováveis no Brasil cresceu, em 2023, baseada principalmente na geração hidráulica (58,9%) e geração eólica (13,2%).

A principal fonte de energia elétrica no Brasil depende das condições climáticas e quantidade de chuvas, o que torna o sistema vulnerável em comparação a uma matriz diversa. Além disso, o Brasil possui condições favoráveis para diversificação da matriz com riqueza de recursos naturais e dimensão territorial. A diversificação da matriz é importante para garantia de energia segura, de baixo carbono e acessível economicamente (SILVA PEREIRA, 2021).

O setor energético é responsável por cerca de 40% das emissões mundiais de Gases do Efeito Estufa (GEE) (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2023). O Brasil emitiu 55,1 kg CO₂ -eq/MWh, considerando as emissões na produção de energia elétrica e isso equivale a cerca de 31% do valor emitido pelos países europeus (EPE, 2023).

Dentre as fontes renováveis disponíveis no Brasil, está o biogás, mistura gasosa de 60% metano e 30% dióxido de carbono principalmente, com frações pequenas de hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio (BRASIL, 2017). O biogás ocorre de forma natural em ambientes como pântanos, sedimentos de rios, entre outros, e é responsável pela mineralização completa de 5% a 10% de toda a matéria orgânica disponível na terra (CHERNICHARO, 2007).

O biogás é proveniente da decomposição da matéria orgânica por microrganismos no processo de Digestão Anaeróbia (DA) (PLUGGE, 2017). E ocorre também no tratamento de efluentes ou em aterros sanitários, e muitas vezes é emitido para a atmosfera sem tratamento ou queimando-o (BRASIL, 2017) o que contribui

para o aquecimento global, já que o metano é um GEE com potencial de aquecimento global cerca de vinte e oito vezes maior que o dióxido de carbono (IPCC, 2013).

Por isso, o aproveitamento do biogás em Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) que operam com unidade anaeróbias de tratamento é uma medida necessária para a redução das emissões atmosféricas e pode ser uma alternativa eficiente de produção de energia descentralizada, por possuir um elevado potencial energético e ser aproveitado como energia térmica, mecânica, elétrica e combustível veicular.

As ETEs são empreendimentos imprescindíveis para a qualidade dos recursos hídricos, embora no Brasil em 2022, somente 52,2% dos esgotos gerados foram tratados e 73,1% dos esgotos coletados foram tratados (BRASIL, 2023). Até 2033 pretende-se expandir as redes de coleta e tratar 93% dos esgotos coletados (BRASIL, 2023). Com o aumento do tratamento de esgotos no Brasil, o potencial de produção de biogás a partir de ETEs pode crescer até 85% (ABILOGÁS, 2021).

Com isto, este trabalho tem como tema o estudo da Integração de Sistemas de Produção de biogás em Estações de Tratamento de Esgotos como Estratégia para resiliência urbana em face às mudanças climáticas. Para tanto pretende-se estudar estimativas de geração de biogás, permitindo assim a estimativa do potencial energético atrelado as ETEs.

Esta pesquisa exploratória foi realizada em quatro estações de tratamento de esgotos, investiga a viabilidade do biogás e analisa dados das estações. Duas ETEs estão localizadas na região metropolitana de Porto Alegre/RS. A primeira, ETE Morada dos Eucaliptos, localizada na cidade de Novo Hamburgo, atende uma população aproximada de 6 mil habitantes, com uma vazão máxima de 864 m³/dia (COMUSA, 2024). A segunda estação em estudo foi a ETE Vicentina, localizada em São Leopoldo, responsável pelo tratamento de aproximadamente 51 mil habitantes, com uma vazão máxima de 8.640 m³/dia (SEMAE, 2024).

A terceira estação está localizada na serra do estado do Rio Grande do Sul, em Caxias do Sul, a ETE Tega atende aproximadamente 200 mil habitantes e apresenta uma vazão máxima de 38.016 m³/dia. A quarta e última estação em estudo, possui a maior vazão e localiza-se em Porto Alegre, capital do estado, a ETE Serraria é responsável pelo tratamento de 1.080.000 habitantes do município, com uma vazão máxima de 354.240 m³/dia.

1.1 JUSTIFICATIVA

Eventos climáticos extremos como ondas de calor, inundações, furacões etc estão se tornando cada vez mais frequentes e não há como evitar situações de stress urbano nas cidades. Os estudos de resiliência urbana então, surgem como uma alternativa para lidar com essas questões. E refere-se à capacidade de um sistema urbano de manter ou retornar rapidamente as funções esperadas após adversidades, além da capacidade adaptativa as mudanças e transformações (MERROW S, 2016).

As Estações de Tratamento de Efluentes então são projetadas, construídas e operadas para remover matéria orgânica, nutrientes, patógenos e controlar a qualidade dos recursos hídricos (BRASIL, 2019). Tratar efluentes domésticos é garantir qualidade de vida para a sociedade. As estações são empreendimentos cujo foco principal é o tratamento da fração líquida, e se dá menor importância aos subprodutos sólidos e gasosos dos efluentes (CHERNICHARO, 2022).

As estações de tratamento de esgotos que possuem o tratamento anaeróbio geram o metano como um dos subprodutos. O metano é um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento global superior ao dióxido de carbono, que pode ser aproveitado como energia térmica, mecânica, elétrica e combustível veicular (IPCC, 2023).

Aproveitar o metano nas estações de tratamento de esgotos pode ser uma maneira eficiente de produzir energia renovável descentralizada e tornar estes empreendimentos mais sustentáveis ambientalmente e financeiramente, além de contribuir para a economia circular, diminuição dos gases do efeito estufa e maus odores, contribuir para o alcance dos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas, principalmente para o sexto objetivo, que trata sobre a “Água Potável e Saneamento” e para o décimo terceiro que trata sobre “Ação contra a mudança global do clima” (ABILOGÁS, 2021).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o aproveitamento de biogás como fonte de energia renovável em Estações de Tratamento de Esgoto.

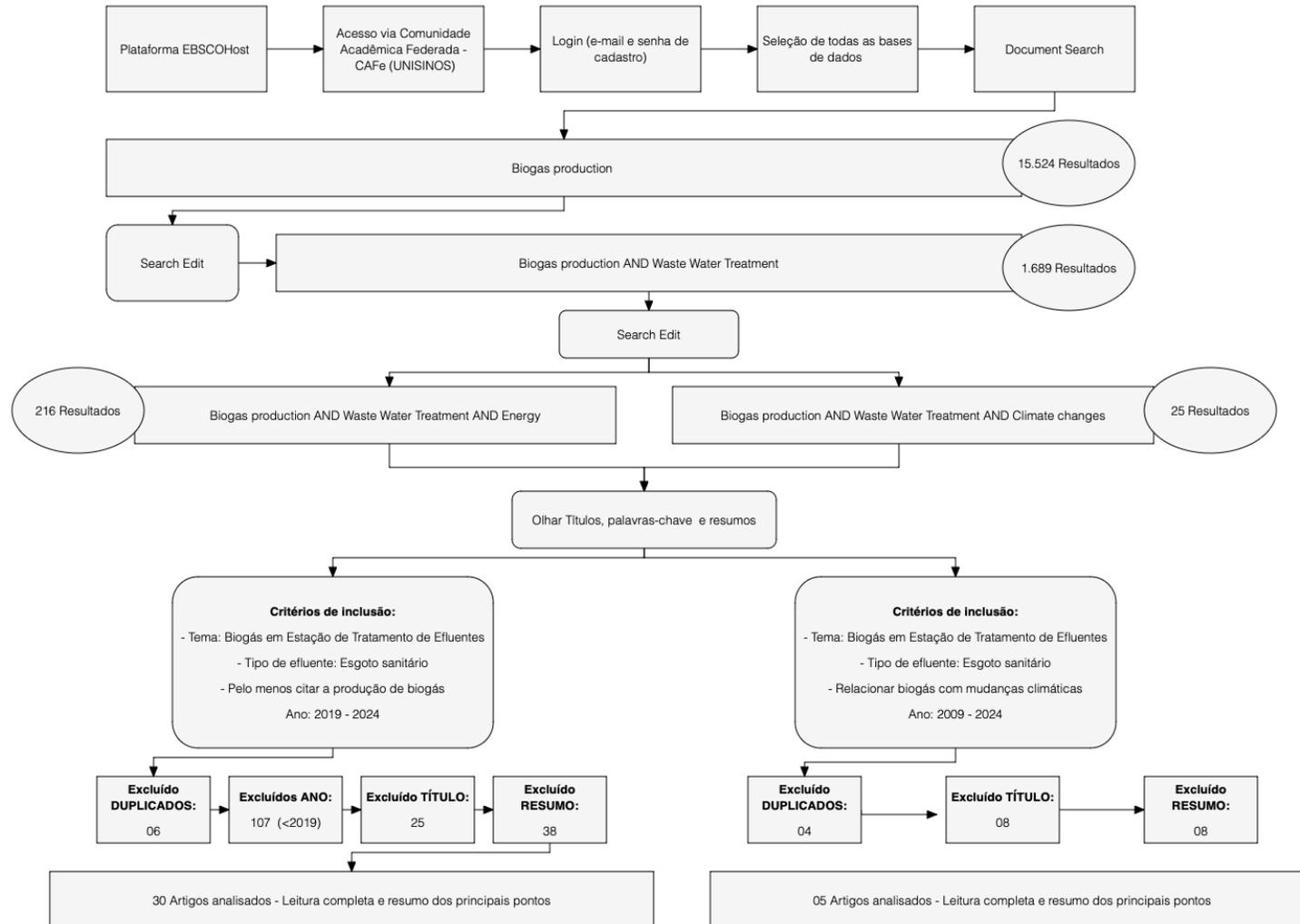
1.2.2 Objetivos específicos

- a) Quantificar o biogás gerado nas ETEs estudadas
- b) Estimar a emissão evitada de gases de efeito estufa nas ETEs estudadas;
- c) Estimar a geração de energia advinda do uso do biogás nas ETEs estudadas;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O método utilizado na pesquisa, foi o de revisão sistemática da literatura, de trabalhos já realizados nesta área, a fim de aprimorar conhecimentos para o desenvolvimento da metodologia e do próprio trabalho. Foi realizada pesquisa na plataforma online EBSCOhost, com acesso a uma ampla gama de bases de dados. A pesquisa foi dividida em duas etapas conforme Figura 1, uma com foco em biogás e energia e a outra com foco em biogás e mudanças climáticas. Foram enquadrados 30 artigos na primeira pesquisa e 5 artigos principais na segunda pesquisa, conforme os critérios de inclusão escolhidos. Estes artigos foram analisados inteiramente e posteriormente a busca foi complementada por artigos de citações dos trabalhos.

Figura 1 - Fluxograma da revisão sistemática da literatura



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A tentativa de entender o clima da terra vem desde o início da humanidade, alguns ciclos como o dia e a noite, fases da lua e estações do ano são observáveis. No entanto, tentar entender qual o melhor período para o plantio e colheita faz parte da agricultura e transformou a sociedade nômade em sedentária, por exemplo (OLIVEIRA, 2018).

No entanto, existem ciclos que são limitados a observação humana, por isso, no século XVII, com a ciência moderna e o auxílio de técnicas e equipamentos foi possível enxergar novos ciclos como da era glacial, interglacial, radiação solar recebida pela terra, entre outros (OLIVEIRA, 2018).

De acordo com a *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2023), as mudanças climáticas referem-se a uma alteração do clima e essas podem ser identificadas pelas alterações nos padrões médios de temperatura e clima observadas durante períodos comparáveis como décadas ou mais.

As mudanças climáticas podem ser naturais como alterações nos movimentos da terra, períodos de atividades vulcânicas e na radiação solar ou podem ser consequências das atividades antrópicas, principalmente devido a queima de combustíveis fósseis que alteram a composição atmosférica (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2024).

A partir da Revolução Industrial, no século XVIII, houve uma forte expansão da produção industrial e com isso um grande aumento na emissão de GEE na atmosfera. O efeito estufa, é um fenômeno natural responsável por regular a temperatura média do planeta, tornando-o favorável para a vida. No entanto, com o aumento da concentração de GEE na atmosfera, ocorre o aumento na intensidade do efeito estufa, e com isso o aquecimento da baixa atmosfera e ocasionando no aumento da temperatura média da terra e mudanças climáticas (RAMOS, 2008).

O setor de energia é responsável pela emissão de 40% das emissões mundiais de GEE (IPCC, 2023) e 23,2% do total de emissões brasileiras (MCTI, 2022). O setor de energia emite GEE em todas as suas etapas, são elas: produção, transformação, transporte e consumo de energia e ainda se dividem em dois subsetores: as emissões

por queima de combustíveis fósseis e emissões fugitivas (MCTI, 2022). Além disso, o setor de águas, que inclui o tratamento de efluentes é responsável por 4% do consumo mundial de eletricidade e é responsável pela emissão de 3% nas emissões totais dos GEE (GUPTA, 2024).

Apostar em fontes renováveis é uma oportunidade financeira e estratégica em prol do crescimento industrial, tecnológico e ambiental (MARINHO, 2023). O aproveitamento de recursos já disponíveis como o biogás das ETEs pode ser considerado como energia verde (ARIAS, 2020) e importante no contexto de bioeconomia e economia circular (DIAMANTIS, 2021).

O enfoque em mudanças climáticas veio com o passar dos anos como a Convenção-Quadro das Nações Unidas, que resultou no Protocolo de Kyoto. No entanto, somente em 2002, ocorreu a Rio+10 ou Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável, terceira Conferência Mundial promovida pela Organização das Nações Unidas para discutir os desafios ambientais do planeta e detalhar objetivos dentro dos princípios já conhecidos (DINIZ, 2002).

Em 2015, nova Conferência das Nações Unidas através da Cúpula de Desenvolvimento Sustentável realizada em Nova York, na sede da ONU. Este evento teve como objetivo finalizar os Objetivos do Milênio (ODM) e iniciar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) como parte da agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2015).

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável consiste num plano de ação ainda mais ambicioso, que busca também erradicar a pobreza extrema, combater a desigualdade e as mudanças climáticas. Para que as ações possam se concretizar, criou-se os ODS (apresenta-se na Figura 2), 17 objetivos divididos em 169 metas para que os governos possam implementar políticas e ações para o desenvolvimento (PNUD, 2017).

Figura 2- Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



Fonte: NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2022

A integração de sistemas de produção de biogás em Estações de Tratamento de Esgotos como estratégia para a resiliência urbana, impacta em no mínimo oito dos 17 ODS que abrangem o saneamento, energia e sua descentralização, indústria e inovação, a contribuição para tornar as cidades mais sustentáveis visando a produção responsável e a descarbonização para proteção climática, além de contribuir com a biodiversidade com parcerias (ABIOGÁS, 2021).

- ODS 06: Água potável e saneamento.

Água limpa, de qualidade e suficiente é um direito essencial a vida, além de facilitar a prática da higiene, mas também previne inúmeras doenças. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2023), em 2021 2 bilhões de pessoas viveram em situação de stress hídrico e a agenda 2030 em seu sexto objetivo de desenvolvimento sustentável, visa alcançar o acesso universal e equitativo a água potável e segura, assim como o manejo sustentável e saneamento para todos.

- ODS 07: Energia limpa e acessível.

O aumento da dependência da sociedade a energias está diretamente ligado ao crescente uso das tecnologias e evolução, já que qualquer atividade requer o uso da energia (SANTOS, 2021). Segundo Energy Information Administration (2021), até 2050 a demanda por eletricidade superará o crescimento da população global. Conseqüentemente, também aumentam as emissões atmosféricas advindas deste

setor, por isso, este objetivo busca garantir acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos (ONU, 2015).

- ODS 09: Indústria, inovação e infraestrutura.

Algumas projeções mundiais indicam que a população mundial chegará a 9,7 bilhões em 2050 (ONU, 2022) e os desafios para acomodar a população aumentará e demandará melhores infraestruturas e mais resilientes de sistemas de energia, saneamento, transporte e de telecomunicações. Por isso, construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação, é o que esse objetivo de desenvolvimento sustentável visa atingir.

- ODS 11: Cidades e comunidades sustentáveis.

A urbanização é um fenômeno que ocorre globalmente, segundo a ONU (2022), até 2050, 68% da população mundial viverá em cidades. A gestão das cidades, por isso, tem inúmeros desafios pela frente, com políticas de uso da terra e habitações principalmente. Por isso o ODS 11, busca tornar as cidades e assentamentos humanos inclusos, resilientes e sustentáveis.

- ODS 12: Consumo e produção responsáveis.

Os padrões de produção e consumo insustentáveis não cabem mais em um planeta que chegará em 9,7 bilhões de pessoas em 2050 (ONU, 2022), ainda mais com mais da metade da população vivendo nas cidades. Por isso, garantir o máximo aproveitamento de recursos, mínimo descarte de resíduos e diminuir os impactos ambientais negativos é a meta do ODS 12.

- ODS 13: Ação contra a mudança global do clima.

O ano de 2023 foi o mais quente já registrado, além de passar por eventos extremos climáticos (ONU, 2024). Alguns locais sofreram com secas e outros com chuvas devastadoras, ciclones etc. E estes eventos climáticos deixam marcas na sociedade impactando a economia, segurança alimentar e qualidade de vida. O objetivo 13 busca então, tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos é imprescindível.

- ODS 15: Vida Terrestre.

Ações antrópicas danosas atingem o ambiente terrestre e provocam um desequilíbrio na fauna e flora, atingindo toda a biodiversidade e todas as pessoas que dependem dela. Por isso, o Objetivo 15, almeja proteger, recuperar e promover o uso

sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade.

- ODS 17: Parcerias e meios de implementação.

Os objetivos de desenvolvimento sustentável são ambiciosos, desafiadores e multidisciplinares e por isso parcerias e tecnologias são fundamentais para atingi-los. O ODS 17 traz em suas metas questões relacionadas a finanças, disseminação da tecnologia, comércio internacional, parcerias multisetoriais e ainda monitoramento e prestação de contas, para fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global, para o desenvolvimento sustentável.

O Quadro 1 a seguir, resume os sete artigos que resultaram na revisão sistemática, no tema das mudanças climáticas.

Quadro 1 - Revisão sistemática de literatura de mudanças climáticas

Citação	Título original	Título traduzido	Resumo	Justificativa para a inclusão desse trabalho
COARA, G. et al 2015	Improvement of wastewaters treatment processes- key factor of environmental protection	Melhoria dos processos de tratamento das águas residuais - fator-chave da proteção do ambiente.	O tratamento das águas residuais é um processo complexo baseado em fenômenos físicos, químicos e biológicos, através dos quais as matérias são dissolvidas e dispersas no meio aquoso, retidas e neutralizadas, de modo a que a sua descarga no meio ambiente não cause danos às pessoas, à flora e à fauna. Dado o grande peso que a fase biológica tem no consumo total de energia em toda a estação de tratamento (mais de 50%), este trabalho centrou-se no aumento da eficiência do tratamento neste domínio. Este estudo foi realizado utilizando o programa de eficiência energética Greenbass para ajustes do sistema de arejamento dos lodos ativados. Este programa é utilizado para lutar contra as alterações climáticas, reduzindo as emissões de gases com efeito de estufa e, por conseguinte, o impacto ambiental.	Ideia principal: Melhorar a eficiência energética da fase de tratamento biológico nas estações de tratamento de esgotos através da implementação do programa de eficiência energética Greenbass. Objetivo: Melhorar a eficiência da fase biológica nas estações de tratamento de águas residuais.
ARIAS, A. et al 2020	Unravelling the environmental and economic impacts of innovative technologies for the enhancement of	Desvendar os impactos ambientais e econômicos de tecnologias inovadoras para a melhoria da produção de biogás e	A adaptação das estações de tratamento de efluentes (ETE) deve ser abordada segundo critérios de sustentabilidade. É sabido que há dois elementos que mais penalizam o tratamento de efluentes: (i) as necessidades energéticas e (ii) a gestão dos lodos. As novas tecnologias devem reduzir estes dois inconvenientes para garantir a eficiência técnica, a	Ideia principal: O reequipamento das estações de tratamento de águas residuárias deve ser abordado segundo critérios de sustentabilidade. É sabido que existem dois elementos que mais

<p>biogas production and sludge management in wastewater systems</p>	<p>da gestão de lodos em sistemas de águas residuárias.</p>	<p>neutralidade em termos de carbono e a redução dos custos econômicos. Neste contexto, o principal objetivo deste trabalho foi avaliar duas estações reais de dimensões diferentes, nas quais foram consideradas modificações importantes: recuperação melhorada da matéria orgânica (MO) no tratamento primário e processo de nitrificação parcial-anammox no tratamento secundário. A modelização de toda a instalação forneceu uma estimativa dos fluxos de entrada e saída de cada unidade de processo, bem como o diagnóstico dos principais indicadores de desempenho, que serviram de base para o cálculo dos indicadores ambientais e econômicos utilizando a metodologia LCA. A combinação de lodos ativados de alta taxa (HRAS) + nitrificação parcial Anammox pode diminuir os impactos ambientais em cerca de 70% na categoria de alterações climáticas (CC) e 50% na categoria de potencial de eutrofização (EP). Para além disso, os custos podem ser reduzidos em 35-45%, dependendo da dimensão da instalação. Além disso, o filtro de correia rotativo melhorado (ERBF) também pode melhorar o perfil ambiental, mas em menor grau do que no cenário anterior, apenas até 10% para CC e 15% para EP. Estes resultados positivos só são possíveis considerando a produção de energia através da valorização do biogás de acordo com o esquema de valorização energética dos resíduos. A modelação à escala da instalação permite a avaliação de tecnologias inovadoras no domínio das águas residuárias. As tecnologias inovadoras podem melhorar o perfil</p>	<p>penalizam o tratamento de águas residuárias: (i) necessidades energéticas e (ii) gestão de lodos.</p> <p>Conclusões: Os resultados positivos só são possíveis considerando a produção de energia através da valorização do biogás de acordo com o esquema de produção de energia a partir de resíduos.</p>
----------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>econômico em 35-45%. O sistema de valorização energética de resíduos reduz os impactos ambientais no tratamento de águas residuárias. A recuperação da matéria orgânica aumenta a produção de biogás e reduz a procura de energia.</p>	
<p>(THOMSEN ET AL., 2018)</p>	<p>Environmental-economic analysis of integrated organicwaste and wastewater management systems: A case study from Aarhus City (Denmark)</p>	<p>Análise ambiental-econômica de sistemas integrados de gestão de resíduos orgânicos e de águas residuárias: um estudo de caso da cidade de Aarhus (Dinamarca).</p>	<p>Este estudo apresenta uma análise comparativa dos desempenhos ambientais e econômicos de quatro cenários de gestão integrada de resíduos e águas residuárias na cidade de Aarhus, na Dinamarca. O objetivo desta análise é fornecer apoio à tomada de decisões sobre se (i) a instalação de trituradores de resíduos alimentares em casas particulares (AS1) ou (ii) a recolha separada e o transporte de resíduos orgânicos para centrais de biogás é uma solução ambiental e econômica mais viável (AS2). A transformação do atual sistema de combustão de resíduos no cenário (ii) permite obter maiores benefícios ambientais, por exemplo, a atenuação dos impactos na saúde humana e das alterações climáticas. As soluções de compromisso em termos de aumento da eutrofização marinha e da ecotoxicidade terrestre resultam da subida na hierarquia dos resíduos, ou seja, da incineração de resíduos para a produção de biogás em estações de tratamento de efluentes com digestão anaeróbia de lodos. O cenário (i) apresenta uma eficiência energética inferior à do cenário (ii). Além disso, quando se considera a incerteza no custo adicional dos danos no sistema de esgotos que podem estar associados à instalação de trituradores de</p>	<p>Ideia principal: Este estudo apresenta uma análise comparativa dos desempenhos ambientais e econômicos de quatro cenários de gestão integrada de resíduos e águas residuárias na cidade de Aarhus, na Dinamarca.</p> <p>Conclusão: Do ponto de vista econômico, ambiental e da eficiência dos recursos, a recolha seletiva e o transporte dos resíduos orgânicos para as unidades de biogás é a solução mais sustentável.</p>

			<p>resíduos alimentares, o cenário (ii) é a solução econômica mais flexível, robusta e menos arriscada. De um ponto de vista econômico, ambiental e de eficiência na utilização dos recursos, a recolha seletiva e o transporte de bioresíduos para as unidades de biogás é a solução mais sustentável.</p>	
--	--	--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

DIAMANTIS, V. et al 2020	Bioenergy in the era of circular economy: anaerobic digestion technological solutions to produce biogas from lipid-rich wastes	A bioenergia na era da economia circular: Soluções tecnológicas de digestão anaeróbia para a produção de biogás a partir de resíduos ricos em lipídeos.	O modelo de economia circular tem ganho cada vez mais atenção na agenda política nos tempos modernos de alterações climáticas e descarbonização. É inegável que a reintrodução dos resíduos nas cadeias de abastecimento e a cobertura das necessidades energéticas das comunidades e empresas locais contribuem para a gestão racional dos resíduos, promovem a eficiência dos recursos e aplicam corretamente o modelo circular. O biogás é um veículo importante para a produção de bioenergia no quadro da bioeconomia moderna. Nesta breve revisão, os fundamentos e a tecnologia para a produção de biogás a partir de lipídeos e resíduos ricos em lipídeos são discutidos de forma meticulosa e crítica. Os digestores anaeróbios com separação externa de lodos e reciclagem são a principal opção para o tratamento de resíduos ricos em lipídeos. Estes sistemas retêm tanto os microrganismos como os lipídeos adsorvidos na biomassa anaeróbia, melhorando assim a produção de metano. Os biorreatores anaeróbios de membrana podem evitar completamente a lavagem dos microrganismos e aumentar a retenção de lipídeos, mas a incrustação da membrana deteriora frequentemente o desempenho hidráulico. A revisão mostra claramente que os dados relativos ao funcionamento de instalações à escala real que tratam resíduos ricos em lipídeos são escassos na literatura. É necessário um esforço por parte de todas as partes interessadas (profissionais, empresas, cientistas e políticos) para alavancar a penetração das tecnologias anaeróbias e explorar os	<p>Ideia principal: É inegável que a reintrodução dos resíduos nas cadeias de abastecimento e a cobertura das necessidades energéticas das comunidades e empresas locais contribuem para a gestão racional dos resíduos, promovem a eficiência dos recursos e aplicam corretamente o modelo circular. O biogás é um veículo importante para a produção de bioenergia no quadro da bioeconomia moderna.</p> <p>Objetivo: Discutir os fundamentos e a tecnologia para a produção de biogás a partir de lipídeos e resíduos ricos em lipídeos.</p> <p>Conclusões: É necessário um esforço por parte de todas as partes interessadas (profissionais, empresas, cientistas e políticos) para alavancar a penetração das tecnologias anaeróbias, para explorar os resíduos ricos em lipídeos, a fim de promover eficazmente a bioenergia renovável e apoiar a bioeconomia.</p>
--------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

resíduos ricos em lipídeos, a fim de promover eficazmente a bioenergia renovável e apoiar a bioeconomia. - São revistos os fundamentos e a tecnologia para a produção de biogás a partir de lipídeos. O pré-tratamento dos lipídeos é um pré-requisito para se conseguir uma digestão anaeróbia de alta taxa. Os digestores anaeróbios com separação externa dos lodos podem aumentar a produção de biogás. Os bioreatores anaeróbios de membrana permitem a retenção completa de microrganismos e lipídeos. É necessária uma maior penetração das tecnologias anaeróbias para explorar os resíduos ricos em lipídeos.

<p>HWANGBO, S. et al 2019</p>	<p>Development of an integrated network for waste-to-energy and central utility systems considering air pollutant emissions pinch analysis</p>	<p>Desenvolvimento de uma rede integrada para sistemas de produção de energia a partir de resíduos e sistemas centrais de abastecimento de energia, tendo em conta a análise das emissões de poluentes atmosféricos.</p>	<p>Este estudo tem como objetivo integrar sistemas centrais de serviços públicos numa grande indústria petroquímica com redes adjacentes de valorização energética de resíduos para formar um sistema de gestão de energia amigo do ambiente. As redes de valorização energética de resíduos estudadas nesta contribuição incluem os seguintes sistemas principais: (1) estações de tratamento de águas residuárias para a produção de biogás, (2) um processo de melhoramento do biogás para a produção de biometano e (3) uma célula de combustível de carbonato fundido juntamente com um ciclo de Rankine para aproveitar a eletricidade verde. Os fluxos de resíduos no modelo proposto consistem em águas residuárias provenientes de estações de tratamento de águas residuárias e vapor residual dos próprios sistemas centrais de serviços públicos. A eletricidade verde derivada é utilizada para satisfazer as necessidades energéticas dos sistemas centrais de serviços públicos. Uma rede de produção de energia a partir de resíduos é simulada por ferramentas de simulação e é formulado um problema de programação linear inteira mista para otimizar os sistemas centrais de serviços públicos com base nos resultados da simulação. Um estudo de caso do complexo industrial petroquímico de Yeosu, na Coreia do Sul, avalia o modelo desenvolvido. Os custos econômicos totais dos sistemas otimizados de centrais elétricas baseados no modelo integrado são reduzidos em cerca de 15% em comparação com os sistemas de centrais elétricas existentes. Os resultados da análise das emissões de</p>	<p>Ideia principal: As redes de valorização energética de resíduos estudadas nesta contribuição incluem os seguintes sistemas principais: (1) estações de tratamento de águas residuárias para a produção de biogás, (2) um processo de melhoramento do biogás para a produção de biometano e (3) uma célula de combustível de carbonato fundido juntamente com um ciclo Rankine para aproveitar a eletricidade verde.</p> <p>Objetivo: integrar sistemas centrais de serviços públicos numa grande indústria petroquímica com redes adjacentes de valorização energética de resíduos para formar um sistema de gestão de energia ecológico.</p> <p>Conclusões: Os resultados da análise das emissões de</p>
-------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

poluentes atmosféricos indicam que as quantidades totais de dióxidos de carbono e óxidos de enxofre emitidos pelo modelo integrado são reduzidas em cerca de 35%. A viabilidade da combinação das duas redes é demonstrada dos pontos de vista ambiental e econômico. São integrados sistemas centrais de distribuição de energia e uma rede de valorização energética de resíduos. É concebido um modelo matemático para os sistemas de serviços públicos centrais otimizados. A análise das emissões de poluentes atmosféricos investiga o impacto ambiental. O modelo proposto é aplicado a um estudo de caso da indústria petroquímica.

poluentes atmosféricos indicam que as quantidades totais de dióxidos de carbono e óxidos de enxofre emitidos pelo modelo integrado diminuem cerca de 35%.

2.2 RESILIÊNCIA URBANA

Escassez de chuvas com secas prolongadas de um lado, chuvas intensas e grandes alagamentos de outro, ondas de calor sem precedentes, vendavais, furacões. Estes são alguns eventos climáticos extremos e não há como evitar situações de stress urbano nas cidades e as mudanças climáticas são agentes destes e tornam-se mais frequentes a cada ano (G20, 2024).

Os estudos de resiliência urbana então, surgem como uma alternativa para lidar com essas questões. O termo resiliência em uma perspectiva ecológica iniciou-se na década de 60 através dos estudos de interações populacionais (FOLKE, 2006). E refere-se à capacidade de um sistema urbano de manter ou retornar rapidamente as funções esperadas após adversidades, além da capacidade adaptativa as mudanças e transformações (MERROW S, 2016).

A resiliência urbana é o oposto de vulnerabilidade e consiste na capacidade das cidades de absorver e adaptar-se as mudanças. Ou seja, a capacidade de se reconstruir após desastres em um tempo e de modo eficientes, o que inclui a preservação, restauração de estruturas e funções essenciais (GUERRA, 2018).

A resiliência urbana exige o planejamento de práticas de gestão de risco, desenvolvimento de infraestruturas, criação de políticas públicas para segurança e adaptabilidade da cidade. Considera aspectos ambientais principalmente, mas também aspectos sociais e econômicos para que a cidade consiga se recuperar de forma eficiente e inclusiva após perturbações incomuns e não esperadas (FOLKE, 2006).

O conceito de resiliência pode motivar uma abordagem para planejar e projetar áreas urbanas para o futuro, mediante a incorporação da mudança climática e adaptação no âmbito do sistema de planejamento. No entanto, além destes conceitos, a resiliência aborda também as oportunidades de perturbação dos sistemas como recombinações de processos e ou estruturas, renovação de sistemas ou ainda evolução do sistema (FOLKE, 2006). É por isso que a resiliência considerando aspectos ecológicos e sociais considera mais importante a ideia de adaptação, aprendizado e auto-organização. No Quadro 2 são abordados os conceitos socioecológicos de resiliência.

Quadro 2 - Interpretação mais restrita ao socioecológico de resiliência

Conceito de resiliência	Características	Foco	Contexto
De engenharia	Tempo de retorno, eficiência	Recuperação e constância	Equilíbrio estável
Ecológica	Resistência a choques, manter a função	Persistência e robustez	Múltiplos equilíbrios, estabilidade, paisagem
Socioecológica	Interação entre perturbação e reorganização, sustentação e desenvolvimento	Capacidade adaptativa, inovação	Sistema integrado, interações dinâmicas entre várias escalas

Fonte: Adaptado de Folke (2006, tradução nossa).

A resiliência de engenharia refere-se ao "tempo de retorno" e à "eficiência", indica a rapidez com que um sistema retorna ao seu estado original após uma perturbação. Seu foco está em manter a estabilidade do sistema após o problema, busca sempre retornar ao seu ponto de equilíbrio original.

A resiliência ecológica já se relaciona com a resistência às adversidades, seu foco é na capacidade do sistema de continuar e manter sua função. Neste conceito o sistema pode ter vários estados de equilíbrio e não necessariamente voltará ao seu estado original.

Já a resiliência socioecológica destaca-se pela capacidade de sustentar e desenvolver o sistema a partir de interações, este conceito foca na importância da adaptação e da inovação contínua. Além de que os sistemas socioecológicos consideram interações complexas entre múltiplos níveis como por exemplo locais.

2.3 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

A maior parte da água dos domicílios se transforma em esgoto após usos básicos como higiene pessoal, lavagem de louça e roupa e limpezas. O esgoto doméstico então é caracterizado como águas residuárias, compostos em média por 99,9% de água e 0,1% de sólidos de natureza orgânica, inorgânica e microrganismos (BRASIL, 2023).

Antes o foco do tratamento de esgotos era a remoção dos constituintes considerados contaminantes quando dispostos no meio ambiente, mas ocorreu uma mudança de paradigma com relação ao esgoto. No século XXI considera-se o esgoto como uma fonte renovável e recuperável de energia de recursos e água. No futuro, as ETEs serão consideradas exportadoras de energia e não mais consumidoras (METCALF & EDDY, 2016).

Segundo Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), o governo brasileiro pretendia investir mais de 500 bilhões de reais em saneamento até 2030 e continha no plano também, a necessidade do investimento em eficiência energética das estações de tratamento inclusive em seus subprodutos como redução da geração de lodo no tratamento e geração de energia pelo biogás (BRASIL, 2013).

Segundo o Instituto Trata Brasil (2024), a universalização do saneamento básico é longa e é imprescindível o aumento de investimentos para ampliar a infraestrutura básica. Ainda segundo o Instituto Trata Brasil (2024), os valores investidos até 2022 são insuficientes para cumprir as metas do Novo Marco Legal do Saneamento até 2033, que estabelecia que todas as localidades brasileiras devessem atender 99% da população com abastecimento de água e 90% com esgotamento sanitário.

A falta de tratamento de esgotos é uma das principais formas de poluição dos recursos hídricos brasileiros e somente 52,2% dos esgotos gerados são coletados no país com redes de esgoto que atendem cerca de 56% da população total. Além disso, o volume de esgoto coletado e tratado foi de 5 bilhões de m³ (81,6%) sendo a meta para 2033 tratar 93% dos esgotos coletados (BRASIL, 2023).

Os constituintes encontrados no esgoto são removidos através de processos unitários de forma física, química e biológica, que formam os tratamentos preliminar, primário, secundário e terciário ou avançado. Importante mencionar que o tipo de tratamento depende das características do efluente e da legislação vigente na região (BRASIL, 2019).

O tratamento de efluentes começa de forma física no tratamento preliminar. O tratamento preliminar tem o objetivo de remover os sólidos grosseiros como resíduos sólidos descartados de maneira irregular e outros para que não danifiquem a operação do sistema de tratamento (METCALF & EDDY, 2016).

A próxima etapa do tratamento ocorre por meio de processos físico-químicos, onde ocorre a equalização, ajuste do pH e remove sólidos suspensos através da coagulação e floculação. Neste processo ocorre a adição de produtos químicos que promovem a aglutinação das partículas pequenas, ocorre então a alteração do peso específico tornando-as mais pesadas que a água e facilitando o processo de decantação (METCALF & EDDY, 2016).

Seguindo o fluxo do tratamento, o processo secundário é a etapa biológica do tratamento, é nesta etapa que ocorre a remoção da matéria orgânica por meio de processos bioquímicos que podem ser por via aeróbia ou anaeróbia. Esta etapa do tratamento, de certa maneira, tenta reproduzir o processo natural de autodepuração, mas em condições controladas e em taxas de depuração mais elevadas (VON SPERLING, 1996)

O tratamento aeróbio ocorre na presença de oxigênio livre, em que os microrganismos aeróbios consomem a matéria orgânica mediante processos oxidativos. Já o tratamento anaeróbio ocorre na ausência de oxigênio e produz biogás, objeto deste estudo, e por isso será estudado de forma mais aprofundada neste trabalho, na seção 2.4. No Quadro 3 são apresentadas as vantagens e desvantagens do tratamento anaeróbio em comparação com o tratamento aeróbio.

A última etapa do tratamento é o tratamento terciário ou avançado, ele é considerado como uma etapa de polimento do efluente, ele remove o restante dos constituintes que não foram removidos no tratamento secundário, além disso, ele serve também para remover constituintes específicos para processos de reuso de água por exemplo. Além disso, ele pode ser a combinação de dois dos processos secundários ou ser complementar, trazendo tecnologias para que o efluente atinja o grau de eficiência necessário (BRASIL, 2021).

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens do tratamento anaeróbio

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Baixa produção de sólidos, cerca de 3 a 5 vezes menor que em processos aeróbios. • Baixo consumo de energia, geralmente associado a uma estação de bombeamento afluente, levando a custos operacionais mais baixos. • Necessita de pouca área. • Baixos custos de construção. • Produção de metano com alto poder calorífico. • Possibilidade de preservação da biomassa sem alimentar o reator por vários meses. • Tolerância a altas cargas orgânicas. • Aplicação em pequena e grande escala. • Baixo consumo de nutrientes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os microrganismos anaeróbios são sensíveis, por isso são suscetíveis à inibição por muitos compostos. • O início do processo pode ser lento na ausência de inoculação com microrganismos adaptados ao efluente que será tratado • A bioquímica e microbiologia da digestão são complexas e requerem mais estudos. • Possível geração de maus odores, embora sejam controláveis. • Possível geração de efluentes com aspecto desagradável. • Remoção insatisfatória de Nitrogênio, Fósforo e patógenos.

Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007, tradução nossa).

2.3.1 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia (DA) representa um sistema ecológico e equilibrado, ocorre em ambientes naturais como pântanos, sedimentos de rios, órgãos digestivos de animais, esterqueiras, entre outros. Este processo é responsável pela

mineralização completa de 5% a 10% de toda a matéria orgânica disponível na terra (CHERNICHARO, 2007).

A Digestão anaeróbia é o processo metabólico de degradação de matéria orgânica sem a presença de oxigênio, o processo faz parte do tratamento biológico anaeróbio nas estações de tratamento e gera como um de seus subprodutos, o biogás na etapa de metanogênese. Este processo é dividido em quatro etapas com cada etapa sucessiva conduzida por diferentes grupos de microrganismo e produzindo diferentes produtos, as etapas são: a hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese (ZIELIŃSKI, 2023).

A hidrólise é a primeira etapa do processo de degradação, é nessa etapa que ocorre a quebra de moléculas maiores como proteínas, carboidratos e lipídeos em moléculas menores como aminoácidos, monômeros e ácidos graxos respectivamente (KUNZ, 2019). A hidrólise é um processo de superfície e o tempo de duração depende do tipo e características do substrato, ela ocorre através de enzimas ligadas à membrana de bactérias hidrolíticas aderidas a superfícies sólidas (MIKI, 2022). E é considerada uma etapa limitante, já que é sensível a flutuações de temperatura (OTIENO, 2024).

Seguindo o processo de DA, na acidogênese ocorre a degradação dos produtos da fase hidrolítica em produtos ainda menores como ácidos orgânicos de cadeias carbônicas curtas, realizado por diferentes bactérias anaeróbias e fermentativas (CHERNICHARO, 2007). A acidogênese é a fase mais rápida da DA, o que indica que as reações liberam mais energia e por isso os reatores anaeróbios ficam sujeitos a acidificação quando são sobrecarregados ou perturbados (MIKI, 2022).

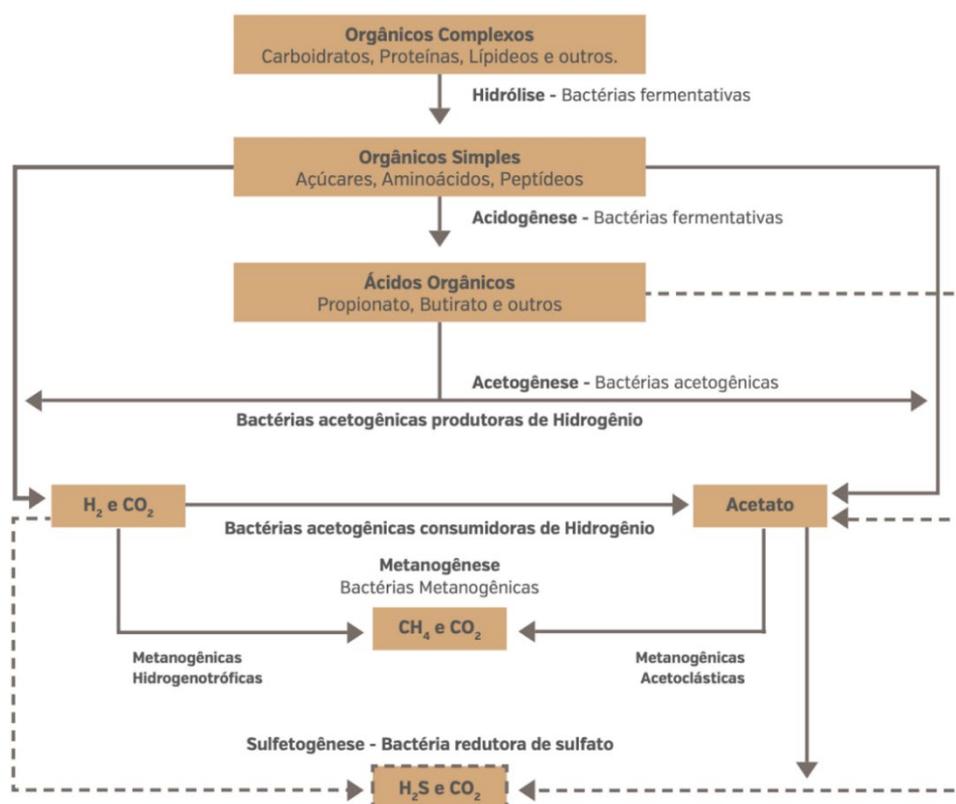
A acetogênese, é a terceira etapa da DA e através de dois grupos de bactérias acetogênicas, oxida os ácidos gerados na etapa anterior. As produtoras de hidrogênio, convertem os compostos orgânicos em acetato, liberando hidrogênio e dióxido de carbono. Já os consumidores de hidrogênio, produzem acetato a partir de hidrogênio e dióxido de carbono (BRASIL, 2017).

A etapa seguinte e a última, é a metanogênese, etapa que as *arquea* metanogênicas convertem o carbono contido no efluente em metano e dióxido de carbono, num ambiente estritamente anaeróbio (KUNZ, 2019). É na metanogênese que

a carga orgânica do afluente é convertida em metano gasoso de baixa solubilidade (MIKI, 2022).

Quando o efluente apresentar sulfato na sua composição, a DA vai incluir o processo de sulfetogênese, que consome o sulfato produzindo gás sulfídrico. No entanto, as bactérias sulforedutoras competem com as metanogênicas comprometendo o rendimento da formação do biogás. Na Figura 3, pode-se observar o processo de DA, assim como suas rotas metabólicas e grupos microbianos (BRASIL, 2017).

Figura 3 - Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia



Fonte: Probiogás (2017)

2.3.2 Reator UASB

Os reatores Anaeróbios UASB, em inglês “*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*”, ou traduzido, Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA), são equipamentos utilizados principalmente em países de clima tropical, onde as temperaturas são mais

elevadas (MENDONÇA, 2017). Além disso, são utilizados em tratamento de esgotos baseados na remoção da matéria orgânica através de reações bioquímicas no processo de DA (PROBIOGÁS, 2017).

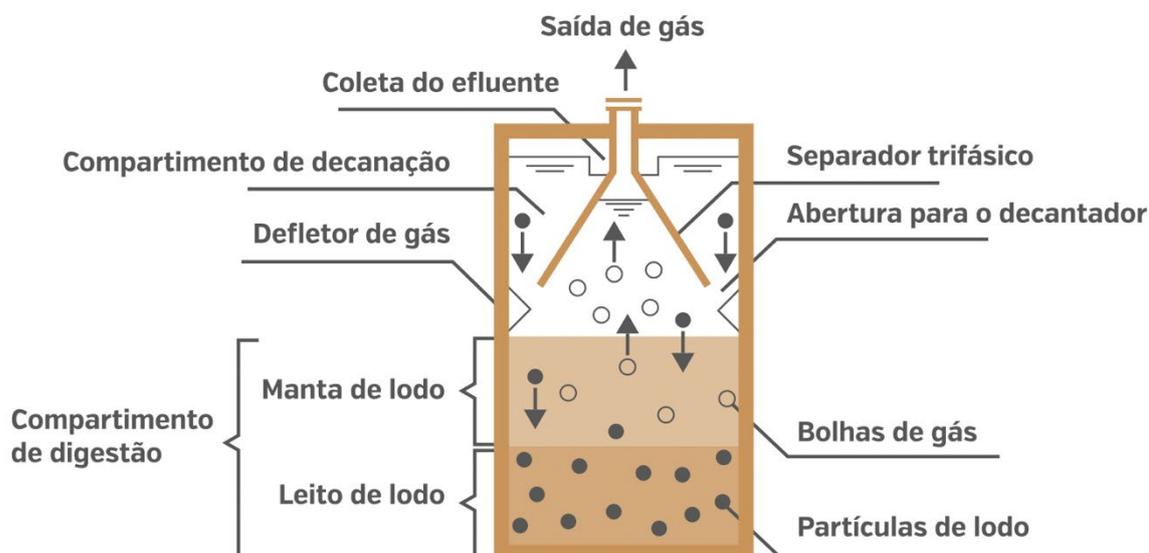
Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), os reatores anaeróbios são os mais utilizados no tratamento de esgotos no Brasil, segundo o Atlas do Esgoto (2020), 37% das ETEs brasileiras são com reator anaeróbio.

O reator UASB não tem necessidade de grandes áreas, por isso é ideal para estações pouca área disponível, o sistema é compacto com baixo custo de construção e operação (DEBOWSKI, M.; ZIELIŃSKI, M, 2022), é eficiente, remove cerca de 75% de DBO e tem uma baixa produção de lodo. No entanto, é um sistema sensível, com baixa tolerância a cargas tóxicas no efluente e quando mal operado pode emitir odores desagradáveis (CHERNICHARO, 2007).

O efluente entra pela base do reator e segue até o topo do equipamento fazendo assim que o fluxo seja ascendente e forçando a passagem do efluente pelo leito de lodo, onde estão os microrganismos responsáveis pela DA (MOURA, 2021). A microbiota deve estar em equilíbrio, e para que isso ocorra, a partida do sistema inicia com quantidades suficientes de lodo anaeróbio, devendo ser alimentado de forma lenta e gradual, podendo chegar a seis meses para pleno funcionamento (PROBIOGÁS, 2017).

Durante a operação, o movimento ascendente do efluente e o fluxo do líquido promovem a auto mistura no sistema. Por isso, todo reator UASB deve possuir um separador trifásico na parte superior do equipamento. Esse componente garante a recirculação do lodo, mantendo-o dentro do reator para prolongar o tempo de detenção, direciona o efluente tratado para as etapas seguintes de tratamento e permite a coleta e queima do biogás gerado. Através da Figura 4 pode-se verificar o esquema de funcionamento do equipamento.

Figura 4 - Esquema de funcionamento de reator UASB



Fonte: Probiogás (2017).

2.3.2.1 Dimensionamento do reator UASB

O reator UASB deve ser dimensionado considerando sua capacidade de desenvolver e manter lodo de alta atividade com características de sedimentação (KUNZ, 2019). Para dimensionar reatores deve-se considerar o tipo de efluente e embora o esgoto doméstico seja um tipo de água residual diluída considera-se um efluente complexo devido seu alto teor de sólidos em suspensão, baixa relação $DQO_{solúvel}/DQO_{total}$, e uma baixa temperatura (MIKI, 2022).

Para iniciar o dimensionamento do reator deve-se ter dados de entrada como vazão média do afluente (Q), carga orgânica média do afluente (DQO), eficiência esperada, temperatura e após a definição do tempo de detenção hidráulica.

O Tempo de Detenção Hidráulica (TDH), a quantidade de tempo que o fluido permanece no sistema. É importante para garantir que os processos do tratamento tenham tempo suficiente para ocorrer. Este parâmetro é calculado através da divisão do volume total do reator (V) e a vazão (Q), conforme Equação 1 e (CHERNICHARO, 2007).

$$TDH = \frac{V}{Q} \quad \text{Equação 1}$$

V = Volume do reator (m³)

Q = Vazão (m³/h)

O TDH para esgotos domésticos varia de 8 a 10 horas para uma temperatura de efluente de 20°C, e considerando que a vazão máxima não deve ser menor que 4 horas e os picos máximos de vazão não devem exceder de 4 a 6 horas. A Tabela 1 apresenta diretrizes para o estabelecimento do TDH em projetos de tratamento de esgoto doméstico.

Tabela 1 - Tempos de detenção hidráulica recomendados para reatores UASB que tratam esgoto doméstico

Temperatura do esgoto (°C)	TDH (h)	
	Média diária	Mínimo
16 - 19	> 10 - 14	> 7 - 9
20 - 26	> 6 - 9	> 4 - 6
> 26	> 9	> 4

Fonte: CHERNICHARO, 2007

Após a definição do TDH, deve-se definir os parâmetros do reator como a Carga Orgânica Volumétrica (COV) que representa a quantidade de substrato adicionado ao biodigestor em um período (KUNZ, 2019). No esgoto doméstico a COV varia de 2,5 a 3,5 kgDQO/m³dia e pode ser calculada através da multiplicação da vazão (Q) e concentração do substrato afluente (S) dividido pelo volume do reator (V), conforme equação 02 (CHERNICHARO, 2007).

$$COV = \frac{(Q \times S)}{V} \quad \text{Equação 2}$$

COV = Carga orgânica volumétrica (kgDQO/m³dia)

S = Concentração do substrato afluente (kgDQO/m³)

Q = Vazão (m³/dia)

V = Volume do reator (m³)

Conhecendo a vazão, a concentração do efluente e assumindo uma carga orgânica volumétrica pode-se obter o volume do reator, reorganizando a equação 02 conforme equação 03.

$$V = \frac{(Q \times S)}{COV} \quad \text{Equação 3}$$

O próximo passo é o cálculo da velocidade de fluxo ascendente do líquido, que é calculada através da divisão da vazão pela seção transversal do reator conforme equação 04.

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Equação 4}$$

v = Velocidade de fluxo

Q = Vazão (m³/dia)

A = Área da seção transversal do reator (m²)

Outro fator importante é o sistema de distribuição do efluente, que deve ser distribuído uniformemente através da parte inferior do reator. Isso garante a redução de zonas mortas no leito do lodo e uma mistura homogênea. Para isso, os tubos devem ser grandes o suficiente para permitir uma velocidade descendente menos que 0,2 m/s e diminuir a incidência de bolhas de ar. No tratamento de esgoto, este parâmetro é atendido, considerando um diâmetro de 75 mm.

O número de tubos de distribuição é determinado pela divisão da área da seção transversal do reator pela área de influência adotada para cada distribuidor conforme equação 05.

$$Nd = \frac{A}{Ad} \quad \text{Equação 5}$$

Nd = Número de tubos de distribuição

A = Área da seção transversal do reator (m²)

Ad = Área de influência de cada reator (m²)

O separador trifásico do reator é a parte do equipamento onde ocorre a separação do líquido, sólido e gás. Uma das principais funções do separador é manter o lodo Anaeróbio dentro do reator permitindo que o sistema seja operado por longos períodos. Isso é obtido pela separação do gás contido na mistura líquida, possibilitando a manutenção das condições ótimas de sedimentação. As dimensões do separador devem permitir fácil liberação do gás aprisionado no lodo e é calculado pela equação 06.

$$Kg = \frac{Qg}{Ai} \quad \text{Equação 6}$$

Kg = taxa de liberação de biogás (m³/m²h)

Qg = produção esperada de biogás (m³/h)

Ai = área da interface líquido-gás (m²)

Importante mencionar que é essencial realizar testes de pressão e estanqueidade das linhas de coleta do biogás, separador trifásico e tampas de inspeção do reator antes da partida do sistema. Testes como injeção de fumaça no separado trifásico pode evitar problemas futuros de vazamento e perdas de gás, consequentemente perda do potencial energético, emissões de GEE sem qualquer tipo de tratamento, riscos de explosão e reclamações advindas de consumidores próximos (PROBIOGÁS, 2017).

O Quadro 4 apresenta critérios de projeto para reatores UASB para países tropicais segundo MIKI (2022).

Quadro 4 - Critérios de projeto para reatores UASB tratando esgoto em países tropicais

Parâmetro	Valor
TDH médio	6 – 8h
Altura	5 m
Densidade de tubos de distribuição	1 tubo a cada 1- 4 m ²
Sistema de distribuição	Cada tubo para um compartimento
Pressão estática na caixa de distribuição do efluente	Até 50 cm
Velocidade ascensional nas aberturas	Média diária de 4 m/h durante 2 – 4h: 8m/h
Velocidade ascensional	0,7 m/h

Fonte: MIKI, 2022

2.4 CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS

A produção de biogás no Brasil foi impulsionada na década de 1970, na busca por energias alternativas para a diminuição do consumo de petróleo e seus derivados na matriz energética. Em 1990, foi impulsionado mais uma vez pelas questões ambientais envolvidas na queima do gás como a redução dos GEE e por meio de projetos inseridos no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que possibilitava a venda de créditos de carbono (MILANEZ, 2021). Em 2003, o biogás voltou a ser impulsionado pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA) (MILANEZ, 2021).

De acordo com o Balanço Energético Nacional (2021), o uso de biogás cresceu cerca de 16% de 2019 para 2020, e o crescimento do setor segue de forma ascendente, em tendência de alta exponencial, quando analisada a quantidade de plantas de biogás em operação e em processo de implantação (CIBIOGÁS, 2021). E este potencial pode crescer ainda mais, segundo o Programa de Energia para o Brasil (2021), o potencial de produção do biogás no setor de saneamento brasileiro pode

crescer mais de 85% até 2033, com potencial de produção de até 926 milhões de Nm³/ano.

O biogás é uma mistura gasosa gerada a partir da digestão anaeróbia (Processo explicado no item 2.3.1), composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono, com pequenas quantidades de hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio (PROBIOGÁS, 2010). A composição do biogás varia conforme fatores como temperatura ambiente, temperatura de fermentação, nível de carga do reator, tempo de detenção hidráulica e composição do substrato (CHERNICHARO 2007) e sua composição típica pode ser visualizada na Tabela 2.

O componente mais relevante da mistura é o metano, que, além de ser um potente gás de efeito estufa, cerca de 28 vezes mais poluente que o dióxido de carbono (IPCC, 2013), é também a fração combustível com seu potencial calorífico entre 15 e 30 MJ/Nm³ de acordo com Kunz, (2019) *apud* Abatzoglou; Boivin (2009).

Quando há sulfato na matéria orgânica degradada, pode ocorrer a formação de algumas impurezas como o ácido sulfídrico, um gás incolor mais denso que o ar com um odor característico e altamente tóxico. E conseqüentemente causar problemas como toxicidade e corrosão no reator (ZILOTTI, 2012).

A viabilidade da produção de biogás contribui para a descentralização e segurança energética e pode equilibrar a o fornecimento de energia local. O biogás pode ser aproveitado de três formas principalmente, na produção de recursos avançados como biocombustíveis gasosos, na produção de energia térmica e na produção de energia elétrica, na qual este trabalho está focado (ZIELINSKI, 2023).

O uso mais tradicional do biogás é sua queima para o aproveitamento do calor para caldeiras e máquinas industriais (MILANEZ, 2021). Nas ETEs, quando utilizado para atender às demandas energéticas internas da estação, o biogás gerado pode atender quase 50-70% das necessidades de energia da planta (GUPTA, 2024), e quando não há aproveitamento do biogás, é realizada a queima no “*flare*” com o objetivo da redução do impacto ambiental e redução de odores (PROBIOGÁS, 2017).

Tabela 2 - Composição do biogás

Gás	Símbolo	Concentração no biogás (%)
Metano	CH ₄	50 - 80
Dióxido de carbono	CO ₂	20 - 40
Hidrogênio	H ₂	1 - 3
Nitrogênio	N ₂	0,5 - 3
Gás Sulfídrico e outros	H ₂ S, CO, NH ₃	1 - 5

Fonte: COLDEBELLA (2006) *apud* LA FARGE (1979).

2.4.1 Transporte do biogás

O biogás é coletado no topo do reator UASB por gasodutos de aço AISI316Ti devido a maior resistência do material ou em polietileno de alta densidade (PEAD). Os tubos devem estar identificados conforme ABNT NBR 12209:2011 e instalados preferencialmente aéreos com suportes para mantê-los suspensos para evitar acúmulos de água condensada e curvaturas (BRASIL, 2017)

Alguns parâmetros para o dimensionamento devem ser adotados como diâmetro mínimo do tubo de 50 mm, prever uma alimentação de biogás instável devido aos picos de geração e quedas de pressão, garantir a velocidade para guiamento do biogás de 3 a 5 m/s e importante garantir a menor perda de carga possível até os queimadores ou sistema de recuperação de energia (BRASIL, 2017).

Os tubos condutores de biogás devem apresentar resistência mecânica, térmica e química devido a variações térmicas, tensões mecânicas e vibrações. Deve atender requisitos de proteção contra incêndio e resistentes a corrosão química provenientes dos compostos ácidos que podem estar presentes no biogás (BRASIL, 2010)

Os gasodutos devem possuir válvulas de controle de vazão facilmente operados com segurança e que permita o isolamento de diferentes partes do gasoduto. Além disso, o sistema deve ser dotado de válvulas corta-chamas, que

protegerão as áreas de formação e de armazenamento de biogás caso haja falhas (ABIOGÁS, 2020).

2.4.2 Tratamento do biogás

O biogás após sua captação necessita de tecnologias de geração de um combustível de qualidade para que se torne energia térmica, mecânica ou elétrica de forma eficiente. Para conversão do combustível em energia elétrica deve-se ajustar o poder calorífico e a remoção dos gases contaminantes a fim de ter um gás mais puro e prolongar a vida útil do sistema (KUNZ, 2019).

O tratamento do biogás depende da composição da mistura, da vazão e do grau de pureza necessária. O grau de pureza é definido considerando o uso do biogás e são necessários sistemas de alta complexidade e eficiência para geração de biometano, por exemplo, para outros usos como geração de energia exigem sistemas mais simples e de menor custo, mas deve seguir os requisitos mínimos exigidos para cada tipo de aplicação (BRASIL, 2017).

O primeiro passo, geralmente, para o tratamento do biogás é a retirada da umidade para prevenção de corrosão dos equipamentos e tubulação. A secagem do biogás pode ocorrer por condensação, por adsorção (gel de sílica, carvão ativado) ou por absorção (desidratação do glicol). Dentre estes processos, o mais utilizado é o de condensação por resfriamento, o biogás é resfriado abaixo do ponto de orvalho, ocorre a remoção da água e então ocorre o aquecimento do gás novamente a temperaturas operacionais (BRASIL, 2017).

A remoção do ácido sulfúrico ou dessulfurização podem ser por processos biológicos, físicos ou químicos, a depender do uso futuro do biogás. A dessulfurização pode ser dividida em duas etapas, a primeira que reduz os níveis a <500 ppm, podendo chegar a 100 ppm. Já a segunda etapa, ajusta as concentrações nas especificações e requisitos para injeção na rede de biogás natural, chegando a menos de 0,005 ppm. A dessulfurização também pode ser dividida em interna ou externa do reator (KUNZ, 2019).

2.4.3 Armazenamento do biogás

A geração de biogás nem sempre é constante, muitas vezes há oscilações em sua produção e para o aproveitamento energético do biogás a planta deve ter um gasômetro para armazenamento, seu tipo e porte dependerão da forma de aplicação do biogás. O dimensionamento do gasômetro deve ser projetado para armazenamento de pelo menos 25% da produção diária, mas é recomendado o volume equivalente do gasômetro de um a dois dias de produção (BRASIL, 2010).

Para ETEs a recomendação é a instalação do gasômetro em linha, devido à falta de homogeneização devido ao processo. A instalação do gasômetro no fluxo principal requer a construção de uma tubulação de desvio (*by-pass*), permitindo tanto o uso do biogás quanto seu direcionamento ao queimador (*flare*) durante manutenções. O *flare* é uma forma alternativa de expurgo do gás em caso por exemplo do gasômetro estar cheio, manutenção, má qualidade do gás ou como forma de segurança (BRASIL, 2017).

O armazenamento e os sistemas de biogás seguem diferentes faixas de pressão: não pressurizado (0 a 0,1 kPa), baixa pressão (1 a 5 kPa) e alta pressão (0,1 a 1 MPa). Para baixas pressões e armazenamento sem compressão, utilizam-se gasômetros infláveis, enquanto tanques de alta pressão armazenam o biogás comprimido com volume fixo (BRASIL, 2017).

Plantas pequenas e médias geralmente adotam armazenamento sem pressão ou de baixa pressão, enquanto a alta pressão é viável apenas em grandes instalações, sendo utilizada acima de 1 MPa para combustíveis veiculares. O avanço tecnológico permitiu o desenvolvimento de diferentes tipos de gasômetros, como membranas com lastro, colchões infláveis e sistemas de membrana dupla (KUNZ, 2019).

As estruturas externas dos gasômetros podem ser feitas de aço soldado ou parafusado, concreto armado ou membranas duplas, influenciando nas inspeções e na segurança operacional. A escolha do modelo impacta diretamente a segurança da planta de biogás e seus equipamentos (KUNZ, 2019).

O Quadro 5, a seguir, resume os artigos que resultaram na revisão sistemática, no tema Estações de Tratamento de Esgotos e biogás.

Quadro 5 - Revisão sistemática de Estações de Tratamento de esgotos e Biogás

Citação	Título original	Título traduzido	Resumo	Justificativa para a inclusão desse trabalho
(OTIENO; CYDZIK-KWIATKOWSKA; JACHIMOWICZ, 2024)	Enhancing Biogas Production Amidst Microplastic Contamination in Wastewater Treatment Systems: A Strategic Review	Melhorar a produção de biogás no meio da contaminação por microplásticos em sistemas de tratamento de águas residuárias: Uma revisão estratégica	Esta revisão destaca a interação significativa entre a poluição por microplásticos (MP) e o seu impacto nos sistemas de tratamento de águas residuárias, centrando-se na otimização da produção de biogás. Exploramos várias fontes de MPs, incluindo MPs derivados de pneus, e a sua introdução em ambientes de águas residuárias. Esta revisão analisa os desafios mecânicos e físico-químicos que os MPs representam nos processos de tratamento, enfatizando a necessidade de estratégias de mitigação abrangentes. São analisados os efeitos biológicos dos MPs nos consórcios microbianos essenciais para a produção de biogás, nomeadamente a forma como estes poluentes interferem em cada fase da digestão anaeróbia - hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese e, conseqüentemente, na produção de biogás. Examinamos os impactos quantitativos e qualitativos dos MPs na produção de biogás e nas taxas de produção, descobrindo como os MPs perturbam a atividade microbiana nestas fases. Esta revisão também discute novas estratégias de mitigação que combinam diferentes métodos de pré-tratamento de lodos com MPs. O nosso objetivo	<p>Ideia do artigo: Artigo de revisão entre a poluição por microplásticos e seus impactos em sistemas de tratamento de efluentes, com foco na otimização da produção de biogás. Além disso, o artigo traz a importância da neutralidade energética das ETEs e o biogás como fator crucial para atingir este objetivo.</p> <p>Objetivo: Sintetizar e analisar as pesquisas existentes sobre os impactos dos microplásticos no tratamento de efluentes.</p> <p>Conclusões: Para gerir eficazmente a contaminação por microplásticos em sistemas de tratamento de águas residuárias, é necessária uma abordagem abrangente. Esta abordagem deve combinar os avanços tecnológicos com quadros regulamentares sólidos e iniciativas de políticas públicas. Além disso, são necessários mais estudos em cada fase da digestão anaeróbia e, conseqüentemente, da produção de biogás.</p>

			é aumentar a sustentabilidade da gestão de águas residuárias, promovendo a produção eficiente de biogás e a proteção ambiental na presença de contaminação persistente por MP.	
(DEBOWSKI; ZIELIŃSKI, 2022)	Wastewater treatment and biogas production: Innovative technologies, research and development directions	Tratamento de águas residuárias e produção de biogás: Tecnologias Inovadoras, Direções de Investigação e Desenvolvimento	Durante a fermentação metabólica de lodos sujeitos a desintegração química com uma dose de reagente de 3,0 mL de STERIDIAL W-10/L, o valor mais elevado de produção diária de biogás (0,28 L) foi observado no décimo dia do processo. Tecnologias de gestão de lodos de depuração Zawieja e Warwag tiveram como objetivo determinar o efeito da desintegração química com ácido peracético na eficiência da produção de biogás utilizando a fermentação de metano de lodos pré-tratados. O desenvolvimento dos métodos de tratamento das águas residuárias e de tratamento dos lodos de depuração está associado à procura de soluções novas, eficazes e tecnologicamente justificadas, cuja utilização constituirá uma alternativa aos sistemas utilizados até à data. O SMF teve um impacto significativo na eficiência da produção de metano, no nível da taxa de fermentação, na taxa de remoção e na estrutura do consórcio de bactérias anaeróbias, mas não afetou a produção cumulativa de biogás [Extraído do artigo].	<p>Objetivo: O objetivo foi indicar os pontos fortes e fracos dos sistemas de digestão, caracterizar os parâmetros tecnológicos que influenciam o curso do tratamento anaeróbio de águas residuárias e a neutralização dos lodos de depuração, apresentar soluções de conceção para biorreatores juntamente com a avaliação da sua eficácia tecnológica e indicar potenciais direções para o desenvolvimento de métodos anaeróbios.</p> <p>Conclusões: Apesar de muitas soluções serem utilizadas com sucesso à escala técnica, continuam a ser procurados métodos universais e eficazes para melhorar a eficiência económica e tecnológica destes processos.</p>

<p>(Górka; Cimochowicz-Rybicka; Poproch, 2022)</p>	<p>Sludge management at the Kraków-Płaszów WWTP—case study</p>	<p>Gestão de lodos na ETAR de Kraków-Płaszów -Estudo de caso.</p>	<p>As estações de tratamento de águas residuárias municipais são bons exemplos de instalações onde o conceito de um modelo de economia circular pode ser efetivamente implementado através da recuperação de energia, bem como de materiais secundários e naturais. É por isso que a co-digestão anaeróbia se tornou uma das vias de energia renovável mais apelativas e assume uma posição-chave nos processos de tratamento de lodos. Esta investigação analisou a viabilidade da utilização de lodos de águas residuárias de uma estação de tratamento de águas residuárias em co-digestão anaeróbia com lodos de depuração. As experiências confirmaram que a digestão anaeróbia de lodos de depuração juntamente com lodos de água residuária melhorou significativamente a produção de biogás. Os melhores resultados foram observados quando os lodos de tratamento de águas residuárias constituíam 30% da massa dos lodos de depuração (como sólidos voláteis, VS). Com isto, foi produzido aproximadamente mais 20% de biogás em experiências laboratoriais, em comparação com a produção de biogás apenas a partir de lodos de depuração. Os resultados, uma vez confirmados a uma escala semi-técnica, ajudarão a desenvolver uma sequência de processos que aumentariam a produção de biogás. Tanto a tecnologia como o produto oferecem uma solução abrangente para os resíduos gerados nas</p>	<p>Ideia do artigo: A co-digestão anaeróbia tornou-se numa das mais apelativas vias de energia renovável e assume uma posição chave nos processos de tratamento de lodos.</p> <p>Objetivo: Analisar a viabilidade da utilização de lodo de estação de tratamento de águas residuárias em co-digestão anaeróbia com lodo de esgoto.</p> <p>Conclusão: Os melhores resultados foram observados quando o lodo de tratamento de água constituiu 30% da massa do lodo de esgoto (como sólidos voláteis, SV). Com essa proporção, foi produzido aproximadamente 20% a mais de biogás nos experimentos de laboratório em comparação com a produção de biogás somente com o lodo de esgoto.</p>
----------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			estações de tratamento de águas residuárias. A abordagem inovadora permite a utilização de vários fluxos de resíduos e o seu processamento combinado de acordo com o princípio da economia circular.	
(Zieliński; Kazimierowicz; Dębowski, 2023)	Advantages and Limitations of Anaerobic Wastewater Treatment— Technological Basics, Development Directions, and Technological Innovations.	Vantagens e limitações do tratamento anaeróbio de águas residuárias - fundamentos tecnológicos, direções de desenvolvimento e inovações tecnológicas.	O tratamento anaeróbio de águas residuárias ainda é uma tecnologia em desenvolvimento dinâmico que garante a degradação eficaz de compostos orgânicos e a produção de biogás. Como evidenciado na larga escala, esta solução tecnológica supera os métodos aeróbios em muitos aspectos. Suas vantagens decorrem da viabilidade de operação com alta taxa de carga orgânica, da menor produção de lodo de esgoto de difícil manejo, do menor espaço e cubatura necessários e do biogás com alto teor de metano produzido. A exploração de reatores anaeróbios está em linha com o pressuposto de uma economia circular, da reciclagem de materiais através da redução das emissões de CO ₂ e do consumo de energia, e da produção de energia renovável. Apesar das suas vantagens inquestionáveis, ainda há necessidade de procurar novas abordagens e melhorar as instalações atualmente exploradas. Os principais	Ideia do artigo: A exploração de reatores anaeróbios está alinhada com os pressupostos de uma economia circular, da reciclagem de materiais através da redução das emissões de CO ₂ e do consumo de energia, e da produção de energia renovável. Apesar das suas vantagens inquestionáveis, ainda há necessidade de procurar novas abordagens e melhorar as instalações atualmente exploradas. Objetivo: O objetivo deste artigo de revisão é apresentar o conhecimento tecnológico até o momento sobre o tratamento anaeróbio de águas residuárias, incluindo soluções padrão e inovadoras, cuja eficácia foi corroborada em instalações em escala piloto.

			<p>caminhos de pesquisa implicam melhorias na estabilidade das operações dos biorreatores e no aumento da adaptabilidade do biorreator a parâmetros de processo variáveis e desfavoráveis. A versatilidade de tais sistemas também seria grandemente melhorada com o aumento das taxas de remoção de nitrogênio e fósforo. Foram feitas tentativas para atingir esses objetivos, estabelecendo zonas separadas dentro dos biorreatores para as etapas individuais da fermentação do metano, incorporando recheios ativos para promover a remoção de nutrientes e introduzindo tratamentos químicos e físicos. Uma solução interessante é também o uso de radiação de microondas para estimular condições de temperatura e induzir fenômenos não térmicos, como aumentar a atividade enzimática da microflora metanogênica. Outra abordagem prospectiva é integrar digestores em sistemas de produção de biomassa de microalgas. O objetivo deste artigo de revisão é apresentar o conhecimento tecnológico até o momento sobre o tratamento anaeróbio de águas residuárias, incluindo soluções padrão e inovadoras, cuja eficácia foi corroborada em instalações em escala piloto.</p>	
LASAKI, B. et al, 2024	Sustainable transformation: Unlocking energy	Transformação sustentável: Libertar a positividade	Motivado pela crescente necessidade de gestão sustentável de águas residuárias e de soluções ambientalmente corretas para o tratamento de águas	Ideia do artigo: Avaliação Abrangente de Configurações de Tratamento Primário Avançado (APT). • Alcançar TSS completo e

	positivity in municipal wastewater treatment through innovative advanced primary treatment configurations for maximum solids separation	energética no tratamento de águas residuárias municipais através de configurações inovadoras e avançadas de tratamento primário para a separação máxima de sólidos.	residuárias no futuro, o presente estudo explorou todas as configurações possíveis para tratamento primário avançado (APT) em uma avaliação de longo prazo, abrangendo extensos estudos laboratoriais e em escala piloto para remoção de carbono orgânico particulado (POC) em estações de tratamento de águas residuárias municipais (ETARs). Este estudo teve como objetivo principal ter uma visão abrangente das várias configurações de APT para tratamento de águas residuárias municipais. O método físico-APT empregou uma micropeneira (MS) com tambor ajustável para malhas de 20 e 100 µm. O processo de floculação foi integrado a um ou dois tanques de sedimentação consecutivos para simular o método químico-APT. Por último, a abordagem químico-física-APT (ChPh-APT) foi emulada combinando o processo de floculação com a técnica MS. Considerando o melhor cenário para remover o máximo de POC, os resultados iluminaram um potencial substancial para o aumento da produção de biogás em cerca de 85% (de 1,3 a 2,4 g (cap. d)-1 convertido na demanda química de oxigênio (DQO) em biogás) através de ChPh - Configuração APT. Além disso, as estimativas mostraram que a remoção máxima de POC pode reduzir significativamente a procura de energia de 42 para 28 kWh (cap. a)-1, aumentando simultaneamente a produção de electricidade verde de 11 para 33 kWh (cap. a)-1. Esta transformação	remoção de TCO _D acima de 90% através do sistema APT. • Demonstração da auto-suficiência da ETAR sem dependência de fontes externas de energia. • Desbloquear o vasto potencial para a produção de AGV, PHA, hidrogénio e biogás.
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			eliminará a dependência de fontes externas de energia e aumentará significativamente a geração de subprodutos como ácidos graxos voláteis (AGV), polihidroxialcanoato (PHA) e hidrogênio (H ₂) no conceito de biorrefinaria. O possível aumento na produção de H ₂ pode ser de aproximadamente 32 a 58 L (cap. d)-1, recuperação de PHA de 1,3 a 2,4 g (cap. d)-1 e AGVs de cerca de 12 a 22 g (cap. d)-1 .d)-1. Conseqüentemente, esta transformação aumentará a eficiência das ETAR municipais e transformá-las-á em entidades energeticamente positivas, sustentáveis e de recuperação de recursos.	
(Dębowski <i>et al.</i> , 2024)	Application of Recycled Filling to Improve the Purification Performance of Confectionery Wastewater in a Vertical Anaerobic Labyrinth Flow Bioreactor.	Aplicação de enchimento reciclado para melhorar o desempenho de purificação de águas residuárias de confeitaria em um biorreator de fluxo de labirinto Anaeróbio vertical.	O tratamento Anaeróbio de águas residuárias é, em muitos casos, uma alternativa justificada aos processos típicos de lodos ativados, do ponto de vista tecnológico, econômico e ecológico. A otimização de reatores de fermentação preocupa-se principalmente em aumentar a biodegradação de compostos orgânicos e a produção de biogás, bem como em melhorar a eficiência na remoção de compostos de nitrogênio e fósforo. O objetivo da pesquisa foi determinar o impacto do uso de enchimento reciclado de baixo custo na eficiência do tratamento de águas residuárias reais de confeitaria em um biorreator anaeróbio vertical de fluxo em labirinto. Os experimentos focaram na seleção da taxa de carga orgânica que permitiria a	<p>Ideia do artigo: Os experimentos focaram na seleção da taxa de carga orgânica que permitiria a efetiva biodegradação e remoção de poluentes, bem como a produção eficiente de biometano.</p> <p>Objetivo: O objetivo da pesquisa foi determinar o impacto da usando enchimento reciclado de baixo custo na eficiência do tratamento de águas residuárias de confeitaria reais em um biorreator de fluxo de labirinto Anaeróbio vertical.</p> <p>Conclusão: Foi observada influência significativa da ROL aplicada na relação entre</p>

			<p>biodegradação e remoção eficaz de poluentes, bem como a produção eficiente de biometano. Verificou-se que o reator testado pode operar eficientemente a uma taxa máxima de carga orgânica (OLR) de 7,0–8,0 g de demanda química de oxigênio (DQO)/L·d. Nesta gama OLR foi garantida uma elevada eficiência tanto no tratamento de águas residuárias como na produção de biogás. Contudo, aumentar o valor de OLR para 8,0 g DQO/L·d teve um efeito negativo significativo no teor de metano (CH₄) no biogás. As variantes mais eficientes alcançaram uma eficiência de biodegradação de cerca de 90% dos compostos orgânicos, um teor de CH₄ superior a 70% no biogás e um rendimento de biogás superior a 400 L/kg de DQO removido. Observou-se uma influência significativa da ROL aplicada na relação entre ácidos orgânicos livres (FOS) e capacidade alcalina total (CAT) e pH, bem como uma forte correlação destes indicadores com o rendimento específico de biogás e o teor de CH₄. A aplicação de uma solução baseada na utilização de um sistema híbrido de lodo granulado anaeróbio e filtro anaeróbio resultou em um processo de tratamento eficiente e na eliminação quase completa das suspensões das águas residuárias.</p>	<p>ácidos orgânicos livres (FOS) e capacidade alcalina total (CAT) e pH, bem como forte correlação desses indicadores com o rendimento específico de biogás e teor de CH₄.</p>
--	--	--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>GUPTA, A. et al, 2024</p>	<p>Investigating the sustainability of biogas recovery systems in wastewater treatment plants- A circular bioeconomy approach</p>	<p>Investigando a sustentabilidade dos sistemas de recuperação de biogás em estações de tratamento de águas residuárias - Uma abordagem de bioeconomia circular.</p>	<p>Opções avançadas de tratamento de águas residuárias oferecem uma oportunidade única para recuperar recursos valiosos, como energia (biogás), nutrientes e minerais incorporados nos fluxos de águas residuárias. No entanto, permanecem desafios consideráveis na concepção e planeamento de sistemas sustentáveis de tratamento de águas residuárias. Este estudo tem como objetivo avaliar a sustentabilidade da recuperação de resíduos em energia na forma de biogás em uma estação de tratamento de águas residuárias (ETAR). O estudo investiga o desempenho de um sistema de recuperação de biogás em diferentes cenários e aplicações de 2018 a 2040, considerando a cidade de Tbilisi, na Geórgia. Os resultados do estudo revelam um potencial significativo de produção de biogás, com uma geração média anual de energia (calor e electricidade) de 137 GWh quando o biogás é recuperado das águas residuárias e dos lodos de depuração. Os sistemas de recuperação de resíduos em energia baseados em ETAR podem evitar emissões de até 38.500 tCO₂ eq todos os anos. O cenário de recuperação combinada é financeiramente viável, com um valor atual líquido de 14,88 milhões de euros e um custo nivelado de biogás de 0,08 euros/m³. O biogás recuperado pode ajudar a evitar a utilização de 172,34 milhões de m³ de gás natural no valor de 42,4 milhões de euros. A análise de sensibilidade</p>	<p>Ideia do artigo: Opções avançadas de tratamento de águas residuárias oferecem uma oportunidade única de recuperar recursos valiosos, como energia (biogás), nutrientes e minerais incorporados nos fluxos de águas residuárias. Objetivo: Avaliar a sustentabilidade da recuperação de resíduos em energia em a forma de biogás em uma estação de tratamento de águas residuárias (ETE). Conclusão: Os resultados do estudo revelam um potencial significativo de produção de biogás, com uma geração média anual de energia (calor e electricidade) de 137 GWh quando o biogás é recuperado a partir de águas residuárias e lodos de depuração. Os sistemas WtE baseados em ETAR podem evitar emissões de até 38.500 tCO₂eq todos os anos.</p>
------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>mostra que a qualidade das águas residuárias, o preço da energia e o custo de capital da planta de digestão anaeróbia são os fatores-chave na determinação da economia dos sistemas de recuperação de resíduos em energia. Esta investigação também demonstra as interligações entre os objetivos de desenvolvimento sustentável e vários benefícios dos sistemas de recuperação de recursos. Este estudo pode ser útil para os decisores envolvidos no planejamento e implantação de sistemas de recuperação de recursos numa abordagem de bioeconomia circular em ETAR a nível mundial.</p>	
--	--	--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

SUN, J. et al, 2023		Previsão da produção de biogás em anaeróbio digestão de uma estação de tratamento de águas residuárias em grande escala usando modelos de aprendizado de máquina agrupados.	A digestão anaeróbia (DA) de lodos é uma abordagem chave para recuperar bioenergia útil do tratamento de águas residuárias e o seu funcionamento estável é importante para uma estação de tratamento de águas residuárias (ETAR). Devido a vários processos bioquímicos que não são totalmente compreendidos, a operação da DA pode ser afetada por muitos parâmetros e, assim, a modelagem dos processos da DA torna-se uma ferramenta útil para monitorar e controlar sua operação. Neste estudo de caso, um modelo DA robusto para prever a produção de biogás foi desenvolvido usando um modelo de aprendizado de máquina (ML) conjunto com base nos dados de uma ETAR em escala real. Oito modelos de ML foram examinados para prever a produção de biogás e três deles foram selecionados como metamodelos para criar um modelo de votação. Este modelo de votação teve um coeficiente de determinação (R^2) de 0,778 e uma raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 0,306, superando os modelos ML individuais. A análise da explicação aditiva de Shapley (SHAP) revelou que o retorno do lodo ativado e a temperatura do afluente das águas residuárias eram características importantes, embora afetassem a produção de biogás de maneiras diferentes. Os resultados deste estudo demonstraram a viabilidade do uso de modelos de ML para prever a produção de biogás na ausência	Ideia do artigo: A digestão anaeróbia de lodo é uma abordagem fundamental recuperar bioenergia útil do tratamento de águas residuárias e sua operação estável é importante para uma estação de tratamento de águas residuárias. Devido a vários processos bioquímicos que não são totalmente compreendidos, a operação da DA pode ser afetada por muitos parâmetros e, assim, a modelagem dos processos da DA torna-se uma ferramenta útil para monitorar e controlar sua operação. Neste estudo de caso, um modelo DA robusto para prever a produção de biogás foi desenvolvido usando um modelo de aprendizado de máquina (ML) conjunto com base nos dados de uma ETAR em escala real. Objetivo: Neste estudo de caso, um modelo DA robusto para prever a produção de biogás foi desenvolvido usando um modelo de aprendizado de máquina (ML) conjunto baseado nos dados de uma ETE em escala real. Oito modelos de ML foram examinados para prever a produção de biogás. Conclusão: Os resultados deste estudo demonstraram a viabilidade do uso de modelos de ML para prever a produção de biogás na ausência de entrada de dados de alta qualidade e melhorar a previsão do
---------------------	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			de entrada de dados de alta qualidade e melhorar a previsão do modelo através da montagem de um modelo de votação.	modelo através da montagem de um modelo de votação.
--	--	--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------

FRANÇOIS, M. et al, 2023	Advancement of nanotechnologies in biogas production and contaminant removal: A review	Avanço das nanotecnologias em biogás, produção e remoção de contaminantes: uma revisão.	O desempenho das nanopartículas depende de vários fatores, como tipo de matéria-prima, dosagem, pH e tipo de nanopartículas. Os desafios da gestão dos combustíveis fósseis, a emissão contínua de gases com efeito de estufa na atmosfera e a crise hídrica global estão atraindo cada vez mais a atenção dos investigadores para formas alternativas de aumentar a eficiência da produção de biogás e do tratamento de águas residuárias. Até onde sabemos, nenhum estudo anterior resumiu ainda o desempenho dos nanomateriais na produção de biogás e na remoção de contaminantes residuárias de águas residuárias. Assim, a presente revisão tem como objetivo descrever o desempenho de nanomateriais na produção de biogás, tratamento de águas residuárias e remoção de contaminantes. Com base na pesquisa identificada, o desempenho das nanopartículas (NPs) depende significativamente da dosagem e da matéria-prima utilizada, da biodegradabilidade da matéria-prima, do pH e do tipo de nanopartículas. Para a remoção de contaminantes, as NPs têm se mostrado eficazes na remoção de CO ₂ e H ₂ S do biogás, bem como na redução da demanda química de oxigênio (DQO) e da demanda biológica de oxigênio (DBO) das águas residuárias. Com base nas evidências, as NPs podem melhorar a produção de biogás e reduzir os contaminantes no biogás e nas águas residuárias. O uso de nanomateriais é recentemente um método	<p>Objetivo: Descrever o desempenho de nanomateriais na produção de biogás, tratamento de águas residuárias e remoção de contaminantes.</p> <p>Conclusão: Mais pesquisas são necessárias para investigar as reduções da pegada de carbono na produção de biogás e no tratamento de águas residuárias, ao mesmo tempo que leva em conta vários outros parâmetros, incluindo o tamanho das nanopartículas e a temperatura da água.</p>
--------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>avançado em relação à abordagem convencional para produção de biogás. A novidade deste estudo destaca que NPs metálicos, NPs de nutrientes metálicos e NPs de óxido de ferro são mais adequados para aumentar a produção de biogás e CH₄ em comparação com NPs de óxido metálico (por exemplo, CuO, Mn₂ O₃, Al₂ O₃ e ZnO). É necessária mais investigação para investigar as reduções da pegada de carbono na produção de biogás e no tratamento de águas residuárias, tendo em conta vários outros parâmetros, incluindo o tamanho das nanopartículas e a temperatura da água.</p>	
--	--	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

LIU, Y. et al, 2019	Thermal pretreatment to enhance biogas production of waste aerobic granular sludge with and without calcium phosphate precipitates	Pré-tratamento térmico para melhorar a produção de biogás de resíduos de lodo granular aeróbio com e sem precipitados de fosfato de cálcio.	Para desenvolver o tratamento sustentável de águas residuárias baseado em grânulos aeróbios, é necessário visualizar o processo de tratamento de águas residuárias e o tratamento do excesso de lodo como um todo para avaliar a recuperação de recursos e a sustentabilidade. Assim, investigamos neste estudo como as características minerais de grânulos aeróbios com/sem fosfato de cálcio precipitam para fósforo. A remoção no processo de tratamento afeta a digestão do excesso de lodo para recuperação de energia. A explosão de vapor a 170 °C como uma abordagem eficaz de tratamento de lodo térmico foi estudada em paralelo com o tratamento térmico normal em autoclave a 70, 100 e 125 °C, respectivamente. Foi encontrada uma relação de revestimento entre a temperatura de tratamento térmico na autoclave e a produção de biogás de grânulos aeróbios. Os grânulos não tratados com apenas 10% de conteúdo mineral (G1) geraram 30% mais biogás do que os grânulos não tratados com 39% de conteúdo mineral (G2), mas a explosão a vapor é mais eficaz para G2 com alto conteúdo mineral e potencial de produção de metano relativamente baixo. Além disso, a explosão a vapor melhorou mais a produção de metano do G2 em comparação com o lodo ativado, embora tanto o lodo ativado não tratado quanto o G2 tivessem produção de metano comparável, ou seja, cerca de 0,235L CH ₄ /g VS. Portanto, a explosão a vapor tem	Ideia do artigo: Desenvolver grânulos aeróbios à base sustentável, é necessário ver o processo de tratamento de águas residuárias e o tratamento do excesso de lodos como um todo para avaliar a recuperação de recursos e a sustentabilidade. Objetivo: Investigar como as características minerais de grânulos aeróbios com/sem precipitados de fosfato de cálcio para remoção de fósforo no processo de tratamento afetam a digestão do excesso de lodo para recuperação de energia. Conclusão: A produção de biogás a partir de grânulos aeróbios depende do conteúdo mineral dos grânulos.
---------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>potencial para ser usada para aumentar a produção de metano, especialmente quando o lodo granular não tratado tem baixo rendimento de metano devido ao alto conteúdo mineral. Este trabalho fornece uma boa base para uma avaliação holística da recuperação de recursos com base em lodo granular aeróbio, ou seja, recuperação combinada de energia e remoção e recuperação de fósforo via precipitados de CaP, e compensação entre diferentes fatores com explosão de vapor.</p>	
--	--	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>PFLUGER, A. et al, 2019</p>	<p>Anaerobic digestion and biogas beneficial use at municipal wastewater treatment facilities in Colorado: A case study examining barriers to widespread implementation.</p>	<p>Digestão anaeróbia e uso benéfico do biogás em instalações municipais de tratamento de águas residuárias no Colorado: um estudo de caso que examina as barreiras à implementação generalizada.</p>	<p>Em 2004, o estado do Colorado tornou-se o primeiro estado dos EUA a implementar um padrão de energia renovável. As concessionárias de energia elétrica cumpriram as metas energéticas do estado usando uma combinação de energia eólica, hidrelétrica e solar, dando relativamente pouca consideração ao biogás gerado a partir do tratamento de águas residuárias domésticas (ou seja, a biomassa é responsável por <0,1% da energia renovável usada no Colorado). Um exame das instalações de tratamento de águas residuárias projetadas para tratar vazões >7.570 m³/d indica que a energia gerada a partir da digestão anaeróbia do lodo de águas residuárias e das tecnologias combinadas de calor e energia é limitada no Colorado. No momento deste estudo, apenas 39% das instalações examinadas utilizavam digestão anaeróbia e apenas 4 das 24 instalações de digestão anaeróbia empregavam ativamente calor e energia combinados. As barreiras à implementação generalizada da digestão anaeróbia e da combinação de calor e energia estavam principalmente associadas a custos, por exemplo, custos de infraestrutura ou de capital de equipamento; no entanto, foram identificadas outras barreiras, incluindo: a eficácia dos programas de subvenções e empréstimos disponíveis, as regulamentações a nível estatal, as estruturas tarifárias dos serviços elétricos, a influência das</p>	<p>Ideia do artigo: Em 2004, o estado do Colorado tornou-se o primeiro estado dos EUA a implementar um padrão de energia renovável. As concessionárias de energia elétrica cumpriram as metas energéticas do estado usando uma combinação de energia eólica, hidrelétrica e solar, dando relativamente pouca consideração ao biogás gerado a partir do tratamento de águas residuárias domésticas (ou seja, a biomassa é responsável por <0,1% da energia renovável usada no Colorado). Conclusão: Este estudo de caso em nível estadual explora um grande número de instalações, cujos resultados podem ser relevantes para outros estados ou regiões e podem fornecer informações sobre barreiras em outros lugares.</p>
--------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>autoridades locais de tomada de decisão e a relutância das instalações de tratamento de águas residuárias em alterar as práticas de digestão de lodos. Para superar essas barreiras, as recomendações para o estado do Colorado incluem: iniciar um programa abrangente focado na promoção de incentivos atuais, revisar a eficácia dos programas de incentivos disponíveis e fazer modificações de longo prazo, promulgar atualizações regulatórias, aumentar a educação e a divulgação e estabelecer um programa promover a co-digestão de lodos de águas residuárias com outros fluxos de resíduos orgânicos. Este estudo de caso em nível estadual explora um grande número de instalações em nível granular, cujos resultados podem ser relevantes para outros estados ou regiões e podem fornecer informações sobre barreiras em outros lugares.</p>	
--	--	--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>YANUKA, K. et al, 2019</p>	<p>An electrode-assisted anaerobic digestion process for the production of high-quality biogas</p>	<p>Um processo de digestão anaeróbia assistida por eletrodo para a produção de biogás de alta qualidade.</p>	<p>O biogás é uma fonte de energia sustentável e renovável gerada a partir de resíduos orgânicos de gradação durante a digestão anaeróbia (DA). DA é aplicado no tratamento de diversos tipos de efluentes, em sua maioria contendo alta carga orgânica. Contudo, a prática da DA ainda é limitada devido à baixa qualidade do biogás produzido. A atualização do biogás para qualidade de gás natural (>90% CH₄) é essencial para aplicações amplas. Aqui, foi desenvolvido um processo inovador de DA assistido bioeletroquimicamente, combinando tratamento de águas residuárias e atualização de biogás. Este processo foi baseado em uma célula de eletrólise microbiana (MEC) que produzia hidrogênio a partir de águas residuárias com uma eficiência relativamente alta, seguida por sistemas Anaeróbios de alta taxa para completar a biodegradação da matéria orgânica e um processo de biometanação in situ. Os resultados mostraram que o rendimento da produção de CH₄ foi substancialmente melhorado após o acoplamento do MEC ao sistema DA. Curiosamente, o aumento do rendimento da produção de CH₄ foi mais notável quando a circulação entre DA e MEC foi aplicada, enquanto a densidade de corrente não foi marcadamente afetada pelas taxas de circulação. A análise da comunidade microbiana confirmou que o MEC melhorou a produção de hidrogênio, levando ao</p>	<p>Ideia do artigo: A Digestão Anaeróbia é aplicada no tratamento de diferentes tipos de águas residuárias, na sua maioria contendo elevada carga orgânica. Contudo, a prática da DA ainda é limitada devido à baixa qualidade do biogás produzido. A atualização do biogás para qualidade de gás natural (>90% CH₄) é essencial para aplicações amplas. Objetivo: Desenvolver um processo inovador de DA bioeletroquimicamente assistido, combinando tratamento de águas residuárias e valorização de biogás. Conclusão: Direcionar o hidrogênio solúvel do MEC para o AD é plausível e tem grande potencial para a valorização do biogás, evitando a necessidade de coleta direta de hidrogênio.</p>
-------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>enriquecimento de metanógenos hidrogenotróficos. Assim, direcionar o hidrogênio solúvel do MEC para a DA é plausível e tem grande potencial para a valorização do biogás, evitando a necessidade de coleta direta de hidrogênio.</p>	
--	--	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>ZAWIEJA, I. et al, 2021</p>	<p>Biogas Production from excess sludge oxidized with peracetic acid (PAA).</p>	<p>Produção de Biogás a partir do Excesso de Lodo Oxidado com Ácido Peracético (PAA).</p>	<p>O funcionamento humano relacionado à vida e à atividade econômica envolve a geração de uma quantidade crescente de esgoto e lodo, que precisa ser submetido a processos avançados de tratamento, neutralização e gerenciamento. A deterioração da suscetibilidade do excesso de lodo à decomposição bioquímica observada em condições anaeróbias leva ao desenvolvimento e aplicação de métodos altamente eficazes de tratamento de águas residuárias baseados na remoção de compostos biogênicos por meio de lodo ativado, com alto grau de espessamento de lodo obtido em instalações mecânicas. A concentração de ácidos graxos voláteis, sendo um importante produto intermediário da estabilização anaeróbia, determina diretamente a eficiência da produção de biogás. Este estudo teve como objetivo determinar o efeito da desintegração química com ácido peracético na eficiência da produção de biogás utilizando fermentação de metano de lodo pré-tratado. A intensificação da fase de hidrólise é um importante determinante da eficiência da decomposição bioquímica do lodo em condições anaeróbias. A associação do excesso de oxidação do lodo, iniciada pelo ácido peracético, com a hidrólise biológica, que é a primeira fase da fermentação do metano, levou a um aumento no grau de digestão do lodo e na eficiência da produção de biogás. Foi utilizado o composto STERIDIAL W-</p>	<p>Ideia do artigo: A deterioração da suscetibilidade do excesso de lodo à decomposição bioquímica observada em condições anaeróbias leva ao desenvolvimento e aplicação de métodos altamente eficazes de tratamento de águas residuárias baseados na remoção de compostos biogênicos por meio de lodo ativado, com alto grau de espessamento do lodo obtidos em instalações mecânicas.</p> <p>Objetivo: determinar o efeito da desintegração química com ácido peracético na eficiência da produção de biogás utilizando fermentação de metano de lodo pré-tratado.</p> <p>Conclusão: A desintegração do excesso de lodo com uma dose de reagente de 3,0 mL de STERIDIAL W-10/L proporcionou uma produção específica de biogás de 0,52 L/g VSS e um grau de digestão de 74% do lodo.</p>
--------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>10, que é uma solução aquosa de 10% de ácido peracético, 10% de ácido acético e 8% de peróxido de hidrogênio. A desintegração do excesso de lodo com uma dose de reagente de 3,0 mL de STERIDIAL W-10/L rendeu uma produção específica de biogás de 0,52 L/g VSS e um grau de digestão de 74% do lodo.</p>	
--	--	--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>ABDELRAHMAN, A. et al 2023</p>	<p>Impact of primary treatment methods on sludge characteristics and digestibility, and wastewater treatment plant-wide economics</p>	<p>Impacto dos métodos de tratamento primário nos lodos características e digestibilidade e economia em toda a estação de tratamento de águas residuárias.</p>	<p>A produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de lodos desempenha um papel central para que as estações de tratamento de águas residuárias se tornem mais eficientes em termos energéticos ou mesmo neutras em termos energéticos. Configurações dedicadas foram desenvolvidas para maximizar o desvio de matéria orgânica solúvel e suspensa para fluxos de lodo para produção de energia por meio de digestão anaeróbia, como tratamento de estágio A ou tratamento primário quimicamente aprimorado (CEPT) em vez de clarificadores primários. Ainda assim, resta investigar até que ponto estas diferentes etapas de tratamento afetam as características e a digestibilidade do lodo, o que também pode impactar a viabilidade econômica dos sistemas integrados. Neste estudo, foi realizada uma caracterização detalhada do lodo obtido de clarificação primária (lodo primário), tratamento em estágio A (lodo A) e CEPT. As características de todos os lodos diferiram significativamente entre si. Os compostos orgânicos no lodo primário consistiam principalmente de 40% de carboidratos, 23% de lipídios e 21% de proteínas. O lodo A foi caracterizada por uma elevada quantidade de proteínas (40%) e uma quantidade moderada de hidratos de carbono (23%) e lipídios (16%), enquanto nas lodos da CEPT os compostos orgânicos eram principalmente 26% de proteínas, 18% de carboidratos, 18% de lignina e 12% de</p>	<p>Ideia principal: Caracterizar as lodos obtidas do clarificador primário, fase A e CEPT.</p> <p>Conclusão: Ao considerar a qualidade dos efluentes dos três sistemas, a CEPT teve maior benefícios, seguido pelo estágio A. A integração da CEPT ou da fase A, em vez da clarificação primária nas estações de tratamento de águas residuárias existentes, melhoraria potencialmente a qualidade dos efluentes e a recuperação de energia.</p>
-----------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>lipídios. O maior rendimento de metano foi obtido a partir da digestão anaeróbia de lodo primário (347 ± 16 mL CH₄ /g VS) e lodo A (333 ± 6 mL CH₄ /g VS), enquanto foi menor para lodo CEPT (245 ± 5 mL CH₄ /g VS). Além disso, foi realizada uma avaliação económica dos três sistemas, considerando o consumo e recuperação de energia, bem como a qualidade dos efluentes e os custos químicos. O consumo de energia da fase A foi o mais elevado entre as três configurações devido à procura de energia de arejamento, enquanto a CEPT teve os custos operacionais mais elevados devido à utilização de produtos químicos. O excedente energético foi o mais elevado pela utilização da CEPT, resultante da maior fração de matéria orgânica recuperada. Ao considerar a qualidade dos efluentes dos três sistemas, a CEPT obteve os maiores benefícios, seguida pela fase A. A integração da CEPT ou fase A, em vez da clarificação primária nas estações de tratamento de águas residuárias existentes, melhoraria potencialmente a qualidade dos efluentes e a recuperação de energia.</p>	
--	--	--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

SARPONG, G. et al 2021	Codigestion and combined heat and power systems energize wastewater treatment plants—analysis and case studies	Codigestão e sistemas combinados de calor e energia energizar estações de tratamento de águas residuárias – Análise e estudos de caso.	A indústria de tratamento de águas residuárias pretende deixar de ser um consumidor de energia para um produtor de energia através da recuperação de energia incorporada em águas residuárias. Existem várias maneiras de alcançar a autossuficiência energética ou o status energético positivo em estações de tratamento de águas residuárias. Este artigo apresenta uma análise do desempenho energético do tratamento de águas residuárias considerando tanto a eficiência energética quanto os mecanismos de recuperação de energia. Vários cenários de tratamento baseados nas características das águas residuárias, capacidade da planta, eficiência do tratamento primário e matéria-prima suplementar são considerados para avaliar o potencial de recuperação de energia no tratamento de águas residuárias. A eficiência energética, o aumento da captura de carbono através da remoção de lodo na unidade de tratamento primário e a produção de biogás através da adição de matéria-prima suplementar são considerados na análise. Considera-se que a codigestão e a integração do sistema combinado de calor e energia aumentam a produção de biogás e, por sua vez, a produção de eletricidade e calor a partir do tratamento de águas residuárias. Estudos de caso destacando o progresso da codigestão e integração de CHP são discutidos em detalhes para compreender o impacto	Ideia principal: A indústria de tratamento de águas residuárias pretende deixar de ser um consumidor de energia para um produtor de energia através da recuperação de energia incorporada em águas residuárias. Existem várias maneiras de alcançar a autossuficiência energética ou o status energético positivo em estações de tratamento de águas residuárias. Conclusão: O estudo confirma que a captura de carbono na unidade de tratamento primário pode contribuir para a conservação de energia a jusante, bem como para aumentar a produção de biogás.
------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>de diversas combinações de matérias-primas e tecnologias. O estudo confirma que a captura de carbono na unidade de tratamento primário pode contribuir para a conservação de energia a jusante, bem como para aumentar a produção de biogás. O potencial de recuperação de energia no tratamento de águas residuárias também aumentou com a força orgânica das águas residuárias e a capacidade de tratamento. Além disso, o tipo, o número e o tamanho da unidade CHP são factores críticos na optimização das perdas de energia no processo de conversão. Apesar dos desafios de codigestão e dos custos de capital necessários tanto para os sistemas de cogeração como para os sistemas de codigestão, a sua integração ainda lidera o caminho a seguir para estações de tratamento de águas residuárias energeticamente positivas e económicas.</p>	
--	--	--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

SAKIEWICZ, P. et al, 2020	Innovative artificial neural network approach for integrated biogas–wastewater treatment system modelling: Effect of plant operating parameters on process intensification	Abordagem inovadora de rede neural artificial para Modelagem integrada de sistemas de tratamento de biogás e águas residuárias: Efeito dos parâmetros operacionais da ETE na intensificação do processo.	Um processo de fermentação anaeróbia para produção de biogás integrado com a purificação de águas residuárias em uma moderna estação de tratamento de águas residuárias (ETE) com capacidade nominal projetada de 27.000 m ³ /dia foi modelada usando redes neurais artificiais (RNAs). Os modelos neurais foram treinados, validados e testados com base em dados industriais em escala real (abrangendo três anos de operação contínua da planta), considerando tanto os aspectos tecnológicos do processo quanto a qualidade das águas residuárias tratadas. Uma abordagem inovadora do efeito simultâneo de sete parâmetros principais ajustáveis de operação da planta, juntamente com as características do esgoto (cinco parâmetros) na produção de biogás, é relatada pela primeira vez na literatura. Uma análise de sensibilidade dos parâmetros indicou claramente a maior importância dos parâmetros do processo de operação no rendimento de biogás em comparação com a qualidade das águas residuárias (DQO, DBO ₅ , SST, Pg, Ng). Os parâmetros do processo de operação foram objeto de modelagem e análise em relação a possibilidades novas e inovadoras e estratégias tecnológicas para aumento do rendimento de biogás. O modelo RNA apresentado pode ser utilizado como ferramenta preditiva, um elemento importante em processos complexos como	Ideia principal: Um processo de fermentação anaeróbia para produção de biogás integrado com a purificação de águas residuárias em uma moderna ETE foi modelada usando redes neurais artificiais (RNAs). Objetivo: Analisar as complexas interações entre sete parâmetros ajustáveis de operação da planta e características do esgoto, utilizando dados industriais reais ao longo de três anos. E identificar os fatores mais influentes no rendimento do biogás e desenvolver novas estratégias para melhorar a produção de biogás. Conclusão: O modelo RNA apresentado pode ser utilizado como uma ferramenta preditiva, um elemento importante em processos tão complexos como estratégias de direção/controle ou para seus procedimentos de otimização, bem como no teste de outros cenários promissores de intensificação e otimização de processos.
---------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>estratégias de direção/controle ou para seus procedimentos de otimização, bem como no teste de outros cenários promissores de intensificação e otimização de processos.</p>	
--	--	--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>GUIMARÃES, M. et al 2021</p>	<p>Microaerophilic treatment enhanced organic matter removal and methane production rates during swine wastewater treatment: A long-term engineering evaluation</p>	<p>Tratamento microaerofílico aprimorou a remoção de matéria orgânica e as taxas de produção de metano durante o tratamento de efluentes suínos: Uma avaliação de engenharia de longo prazo</p>	<p>A biotecnologia anaeróbia tem sido amplamente utilizada no tratamento de águas residuárias de suínos. No entanto, a sua taxa de carregamento orgânico (OLR) é muito inferior ao esperado, principalmente devido à baixa taxa de hidrólise. Neste estudo, o desempenho comparativo do processo e a eficiência de um reator de manta anaeróbia de lodo de fluxo ascendente (UASB) (R1) e um reator de manta de lodo microaeróbio de fluxo ascendente (UMSB) (R2) foram avaliados para tratamento de águas residuárias de suínos, operando por 264 dias. Sob OLRs mais elevados e tempos de detenção hidráulica mais baixos do que os encontrados na literatura. O R2 foi submetido a três diferentes doses de ar: 0,09 (estágio I), 0,17 (estágio II) e 0,25 (estágio III) $L_{O_2} L_{\text{ração}}^{-1} d^{-1}$ visando potencializar a etapa de hidrólise da digestão anaeróbia (DA). Os resultados gerais mostraram que 0,17 $L_{O_2} L_{\text{ração}}^{-1} d^{-1}$ foi a melhor condição experimental avaliada, que forneceu eficiências de remoção de sólidos suspensos voláteis, demanda química total de oxigênio e demanda química particulada de oxigênio de $85,0 \pm 1,9\%$, $83,8 \pm 2,5\%$. e $82,1 \pm 4,8\%$, respectivamente. Esse desempenho deveu-se à maior hidrólise da matéria orgânica, resultando em maior produção de metano. Portanto, o tratamento do reator USB demonstrou ser uma alternativa viável para RSS,</p>	<p>Ideia principal: O processo de tratamento microaerofílico (reator USB) pode melhorar significativamente a hidrólise da matéria orgânica em águas residuárias suínas, levando a maiores eficiências de remoção de sólidos suspensos voláteis, demanda química total de oxigênio (DQO) e DQO particulado, bem como aumento de metano. produção. Objetivo: Avaliar e comparar o desempenho de um reator de manta de lodo anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) e de um reator de manta de lodo microaeróbio de fluxo ascendente (UMSB) no tratamento de águas residuárias de suinocultura, particularmente sob taxas de carga orgânica (OLRs) mais altas e tempos de retenção hidráulica mais baixos do que normalmente relatados na literatura. Conclusão: o tratamento do reator USB demonstrou ser uma alternativa viável para águas residuárias de suinocultura, embora algumas estratégias para controlar a lavagem de biomassa devam ser investigadas.</p>
---------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			embora algumas estratégias para controlar a lavagem de biomassa devam ser investigadas.	
--	--	--	-----------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>GUO, G. et al 2023</p>	<p>Evaluation of bioenergy production and material flow in treating Japanese concentrated Johkasou sludge using high-solid anaerobic membrane bioreactor based on one-year operation</p>	<p>Avaliação da produção e material de bioenergia fluxo no tratamento de lodo japonês concentrado de Johkasou usando biorreator de membrana anaeróbia de alto teor de sólidos com base na operação de um ano.</p>	<p>O tratamento de lodo residual gerado em estações de tratamento de águas residuárias locais (Johkasou), aplicado extensivamente no Japão, é uma preocupação fundamental. Neste estudo, um biorreator de membrana anaeróbia de alto teor de sólidos (AnMBR) foi operado continuamente ao longo de um ano para investigar a produção de bioenergia, o fluxo de materiais e os impactos sazonais do lodo concentrado de Johkasou (CJoS). O CJoS possui maior relação carbono-nitrogênio e fração lipídica, mas menos proteínas do que lodo ativado por resíduo. O rendimento de biogás de CJoS por AnMBR variou de 0,47 a 0,52 L/g-VS alimentado, que foi maior que a digestão anaeróbia de lodo ativado e menor que lodo de esgoto misto de estações centralizadas de tratamento de águas residuárias. A maior taxa de produção de biogás foi observada durante o verão (0,63 L/L/d), devido ao elevado conteúdo orgânico e sólido total. No entanto, o CJoS de inverno apresentou o maior rendimento de biogás e taxa de conversão de carbono devido à conservação da matéria orgânica solúvel em baixa temperatura e alta digestibilidade. Os resultados do fluxo de material revelaram que 46,5–52,4% de DQO total e 50,2–58,0% de carbono foram convertidos em biogás. As taxas de recuperação energética variaram de 8,69 a 9,96 kJ/g-VS alimentado e as taxas de autossuficiência energética do sistema variaram de 1,92 a 3,02. A desidratabilidade ideal do</p>	<p>Ideia principal: Neste estudo, um biorreator de membrana anaeróbia de alto teor de sólidos (AnMBR) foi operado continuamente ao longo de um ano para investigar a produção de bioenergia, fluxo de material e impactos sazonais do lodo concentrado de Johkasou (CJoS).</p> <p>Conclusão: Os resultados demonstraram que o AnMBR produziu alta eficiência de conversão de energia sem co-digestão e processamento de pré-tratamento.</p>
-------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>lodo digerido foi alcançada quando a dosagem do floculante de poliamidina foi de 30 mg/g-MLSS e a resistência específica do lodo correspondente à filtração foi de $2,26 \times 10^{12}$ m/kg. Os resultados demonstraram que o AnMBR produziu alta eficiência de conversão de energia sem co-digestão e processamento de pré-tratamento.</p>	
--	--	--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>KADAM, R. et al 2023</p>	<p>Realizable wastewater treatment process for carbon neutrality and energy sustainability: A review</p>	<p>Processo viável de tratamento de efluentes para neutralidade de carbono e sustentabilidade energética: Uma revisão</p>	<p>Apesar de uma rápida mudança nas metas globais em direção a infraestruturas neutras em carbono, os sistemas convencionais baseados em lodos inibem o <i>Green New Deal</i>. Aqui, uma estação de tratamento de efluentes municipal (ETE) para a neutralidade carbônica e a sustentabilidade energética é sugerida e discutida com base em aspectos técnicos realizáveis. Os orgânicos foram recuperados usando diversas técnicas de tratamento primário aprimoradas, reduzindo assim a demanda de oxigênio para a oxidação dos orgânicos e maximizando a produção de biogás em processos biológicos. Enquanto isso, o amônio nas águas residuárias orgânicas separadas é oxidado bioeletroquimicamente a N_2 e reduzido a H_2 sob condições completamente anaeróbias, resultando na minimização das necessidades de energia e na produção de lodo residual, que são os principais problemas nos processos convencionais baseados em lodo ativado. O processo de digestão anaeróbia converte o lodo primário concentrado em biometano, e o gás H_2 recuperado do nitrogênio melhora a qualidade do biometano, reduzindo o dióxido de carbono no biogás. Com base nestes resultados, as ETEs podem ser simplificadas e melhoradas com elevadas eficiências de processo e energética.</p>	<p>Ideia principal: os sistemas tradicionais baseados em lodos ativados são ineficientes e dificultam progressos rumo ao <i>Green New Deal</i> devido ao seu elevado consumo de energia e à produção de lodos residuárias. Objetivo: Propor e discutir um projeto de estação de tratamento de águas residuárias municipais (ETAR) que se alinhe com as metas de neutralidade de carbono e sustentabilidade energética, abordando as limitações dos sistemas convencionais de lodos ativados. Conclusão: Uma estação de tratamento de águas residuárias municipais (ETAR) redesenhada, utilizando tecnologias avançadas, pode aumentar significativamente a neutralidade carbônica e a sustentabilidade energética.</p>
---------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>REY-MARTÍNEZ, N. et al 2021</p>	<p>Comparing continuous and batch operation for high-rate treatment of urban wastewater</p>	<p>Comparando operação contínua e em batelada para tratamento de alta taxa de águas residuárias urbanas.</p>	<p>A ligação água-energia mudou o conceito de estações de tratamento de águas residuárias (ETAR), que deveriam passar de consumidores de energia para instalações energeticamente neutras ou mesmo energeticamente positivas. O processo A/B visa alcançar energia autossuficiente ETARs: a matéria orgânica é removida na primeira etapa (estágio A) e derivada para a produção de biogás, enquanto a remoção autotrófica de nitrogênio é implementada em uma segunda etapa (estágio B). Este trabalho compara dois sistemas de alta taxa que podem ser usados como estágio A tendo em vista a remoção de matéria orgânica: um reator contínuo de lodo ativado de alta taxa (HRAS) e um reator em batelada de sequenciamento de alta taxa (HRSBR). Ambos os sistemas foram operados com águas residuárias urbanas reais em um curto tempo de retenção hidráulica (2,5h) e em um curto tempo de retenção de lodo (SRT) de 1–2 d para minimizar a mineralização de DQO e maximizar o desvio de matéria orgânica para a produção de metano e, portanto, energia recuperação. O HRAS apresentou maiores eficiências de remoção de DQO e melhor recuperação de energia. Por outro lado, o HRSBR foi melhor para evitar nitrificação indesejada e proporcionou menor mineralização de DQO para todos os SRTs testados (variando de 20 a 48% para o HRSBR e 41 a 58% para o HRAS). Então, a energia na forma de metano recuperada por unidade</p>	<p>Ideia principal: Avaliar qual dos dois sistemas de alta taxa, HRAS ou HRSBR, é mais eficaz para a primeira fase de um processo de tratamento de águas residuárias em duas fases que visa maximizar a recuperação de energia.</p> <p>Conclusão: O HRSBR parece ser uma boa opção, pois o teor de sólidos no efluente foi semelhante para ambos os sistemas e sua eficiência de remoção de DQO pode ser melhorada otimizando a configuração do ciclo SBR.</p>
------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>de DQO degradada foi maior no HRSBR. O HRSBR parece ser uma boa opção, pois o teor de sólidos no efluente foi semelhante para ambos os sistemas e sua eficiência de remoção de DQO pode ser melhorada ainda mais otimizando a configuração do ciclo SBR.</p>	
--	--	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>HENRIQUES, A. et al, 2020</p>	<p>Leveraging logistics flows to improve the sludge management process of wastewater treatment plants</p>	<p>Aproveitar os fluxos logísticos para melhorar o lodo processo de gestão de estações de tratamento de águas residuárias.</p>	<p>Neste artigo, propomos uma abordagem inovadora para integrar o sistema de águas residuárias tratamento (ETAR) que é realizado num conjunto de plantas e a digestão anaeróbia (AD) que é realizada num conjunto diferente de plantas, todas do mesmo sistema. O objetivo é contribuir para melhorias de sustentabilidade (por exemplo, redução de custos e benefícios ambientais e sociais) dentro do sistema. Os principais impulsionadores que apoiam esta abordagem são a existência de capacidade não utilizada em alguns digestores e a possibilidade de reduzir a idade dos lodos de processo para manter o seu potencial de biogás durante o tratamento aeróbio nas instalações sem instalações de DA. Além disso, também é considerado o efeito da co-digestão como forma de aumentar a quantidade de biogás que pode ser produzido através do lodo. Esta abordagem inovadora leva a um modelo de programação linear inteira mista (MILP) para otimizar os fluxos de lodo que conectam as plantas sem instalações de AD àquelas com digestores Anaeróbios. A abordagem desenvolvida foi aplicada a uma concessionária de água portuguesa e os resultados fornecem novos insights para um processo otimizado de gestão de lodos de ETAR, indicando também que o benefício económico obtido com a estratégia proposta para a gestão de lodos pode levar a uma redução de até 23,5% na termos dos custos atuais de energia.</p>	<p>Ideia do artigo: Os principais impulsionadores que suportam esta abordagem são a existência de capacidade não utilizada em alguns digestores e a possibilidade de reduzir a idade dos lodos de processo para manter o seu potencial de biogás durante o tratamento aeróbio nas plantas sem instalações de DA.</p> <p>Objetivo: Melhorar a eficiência energética nos processos de tratamento e recuperar mais energia do lodo residual gerado.</p> <p>Conclusões: Observa-se uma diminuição de até 23,5% dos custos atuais de energia</p>
----------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

SANAYE, S. et al, 2022	Biogas augmentation and waste minimization by co-digestion process in anaerobic digestion system of a municipal waste water treatment plant	Aumento de biogás e minimização de resíduos por processo de codigestão em sistema de digestão anaeróbia de uma estação de tratamento de águas residuárias municipais.	Digestores Anaeróbios da estação de tratamento de efluentes (ETE) de Teerã, trabalhando em operação de monodigestão, são investigados não apenas para aumentar o metano, mas também para minimizar resíduos pelo uso do processo de co-digestão. Três tipos de resíduos de co-substrato, incluindo graxas de flotação de matadouros, resíduos biológicos e esterco bovino, foram selecionados porque estavam disponíveis em grandes quantidades. Foi necessário um modelo para prever as taxas de fluxo volumétrico de alimentação de resíduos de co-substrato nos digestores durante o tempo de operação para fornecer biogás suficiente para gerar a potência máxima do motor a gás. Assim, o Modelo de Digestão Anaeróbia Número 1 (ADM1) para mono-substrato é modificado para que possa ser usado com caracterização de lodo primário, lodo secundário e diversas entradas de resíduos de co-substrato em digestores. Em seguida, os coeficientes apropriados (coeficiente de hidrólise e fator de biodegradabilidade) neste modelo foram determinados pelo uso de testes de potencial bioquímico de metano (BMP) do lodo. Após completa modificação, calibração e validação do método ADM1 com valores experimentais de lodo primário e secundário para digestão anaeróbia (que é a realidade atual na ETE de Teerã), o modelo desenvolvido é integrado a uma estratégia de alimentação de co-substrato para estimativa do fluxo	<p>Ideia do artigo: Digestores Anaeróbios da estação de tratamento de efluentes (ETE) de Teerã trabalhando em operação de monodigestão são investigados não apenas para aumento de metano, mas também para minimização de resíduos pelo uso de processo de co-digestão.</p> <p>Conclusões: concluiu-se que os biorresíduos são um co-substrato adequado para o nosso estudo de caso.</p>
------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>de alimentação necessário taxas de resíduos de co-substrato. Os resultados indicaram que</p> <p>alimentar gordura, resíduos biológicos e esterco aumentou a média de biogás gerado de 10.524 m³/dia (62,1% CH₄) para 29.161 m³/dia (61,5% CH₄), 30.183 m³/dia (59,5% CH₄) e 32.531 m³/dia (53,8% CH₄), respectivamente. Além disso, a potência do motor a gás aumentou de um valor médio de 906 kW para cerca de 2,5 MW (durante o período de operação estudado). O baixo coeficiente de hidrólise e a baixa degradabilidade do esterco causaram uma alta vazão de alimentação biodegradável desses resíduos de co-substrato para cerca de 58.200 kg DQO b/dia em média. Esse valor para biorresíduos e graxas foi de 38.800 e 36.100 kgDQO b/dia, respectivamente. A alimentação de gordura e biorresíduos nos digestores aumentou a eficiência de remoção de DQO de 37% para 58% e 54%, respectivamente, enquanto a alimentação com estrume a reduziu para 31%. Além disso, os valores dos indicadores de pH e AGV/Alk apresentaram condições estáveis nos digestores. Além disso, verificou-se que todos os três processos de co-digestão não impuseram uma nova carga a outros equipamentos da ETE para redução de azoto no fluxo de efluentes da ETE. Finalmente, concluiu-se que os biorresíduos são um co-substrato apropriado para o nosso estudo de caso.</p>	
--	--	--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

ACHINAS, S. et al, 2019	Feasibility study of biogas production from hardly degradable material in co-inoculated bioreactor	Estudo de viabilidade de produção de biogás a partir de material dificilmente degradável em biorreator co-inoculado	A tecnologia anaeróbia é uma técnica bem estabelecida para eliminar a indústria baseada em combustíveis fósseis. O tratamento de biorresíduos é favorável devido às suas baixas emissões. O biogás é considerado apenas o principal produto da digestão anaeróbia com alto valor energético. Uma das principais preocupações das estações de tratamento de águas residuárias é a grande quantidade de resíduos celulósicos produzidos após o tratamento das águas residuárias. A fração peneirada fina, coletada após a remoção do lodo primário, possui grande valor energético. Neste estudo, o desempenho econômico de uma usina de biogás foi analisado com base nos conceitos de valor presente líquido e período de retorno. A planta do cenário base produziu 309.571 m ³ de biogás por ano. A produção anual de eletricidade foi de 390.059 kWh. A energia térmica produzida foi de 487.574 kWh ou 1.755 GJ por ano. A fábrica apresenta uma situação econômica positiva com um período de retorno de 11 anos, obtendo lucros baixos e apresentando um valor atual líquido positivo de 11.240 €.	<p>Ideia do artigo: Recentemente foi relatada uma técnica alternativa para a melhoria do desempenho da DA. A co-inoculação com dois ou mais inóculos proporciona um vasto e amplo consórcio de microrganismos dentro do biorreator.</p> <p>Objetivo: Analisar a viabilidade de inoculação combinada através de testes experimentais e avaliação financeira. Análise de fluxo de caixa foi realizado para avaliar a viabilidade de uma planta de biogás.</p> <p>Conclusão: A fábrica apresenta uma situação econômica positiva com um período de retorno de 11 anos, obtendo lucros baixos e apresentando um valor atual líquido positivo de 11.240 €.</p>
-------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>WANG, C. et al, 2022</p>	<p>Enhanced dissolved methane recovery and energy-efficient fouling mitigation via membrane vibration in anaerobic membrane bioreactor.</p>	<p>Recuperação aprimorada de metano dissolvido e mitigação de incrustações com eficiência energética por meio da vibração da membrana em biorreator de membrana anaeróbia.</p>	<p>Este trabalho desenvolveu com sucesso um novo AnMBR vibratório (VAnMBR) e investigou seu desempenho a longo prazo, controle de incrustações e recuperação de energia em comparação com o AnMBR convencional com pulverização de biogás (BSAnMBR). O VAnMBR obteve melhor remoção de orgânicos em comparação ao BSAnMBR devido ao menor teor de biopolímeros em seus efluentes. Além disso, o VAnMBR retardou o aumento inicial do TMP para aliviar eficazmente a incrustação da membrana, com taxas de incrustação 49,7% a 80,2% mais baixas do que o BSAnMBR. Quantidades reduzidas de nanopartículas foram consistentemente observadas nos sobrenadantes do VAnMBR, revelando seus benefícios para restringir fontes de incrustações para melhor controle de incrustações. É importante ressaltar que o VAnMBR poderia economizar 81,9% a 94,1% da energia do BSAnMBR e aumentar a recuperação de biogás de 11,1% a 35,0% resultante da minimização do metano dissolvido, induzindo mais produção líquida de energia durante o tratamento de águas residuárias. O desempenho favorável do VAnMBR torna-o uma tecnologia promissora para substituir a estação de tratamento de águas residuárias convencional como uma instalação de recuperação de recursos de próxima geração.</p>	<p>Ideia do artigo: Um novo AnMBR vibratório foi desenvolvido para tratamento de DWW real de longo prazo.</p> <p>Conclusões: O desempenho favorável do VAnMBR torna-o uma tecnologia promissora para substituir a estação de tratamento de águas residuárias convencional como uma instalação de recuperação de recursos de próxima geração.</p>
-----------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>ZIJING, A. et al, 2023</p>	<p>Anaerobic membrane bioreactor for the treatment of high-strength waste/wastewater: A critical review and update</p>	<p>Biorreator de membrana anaeróbia para o tratamento de resíduos/águas residuárias de alta resistência: uma revisão crítica e atualização.</p>	<p>São fornecidos os desafios atuais e a direção futura no desenvolvimento do AnMBR. Biorreator de membrana anaeróbia (AnMBR), que integra filtração por membrana com processo Anaeróbio, atinge alta remoção de DQO (~95%) com curto tempo de retenção hidráulica, oferecendo significativo vantagens para a recuperação eficiente de energia e recursos. Esta revisão concentra-se na aplicação de AnMBRs em vários resíduos/águas residuárias de alta resistência, incluindo águas residuárias industriais, lixiviados de aterros, resíduos de alimentos e lodos ativados de resíduos, destacando as vantagens que oferece na produção de energia e degradação de contaminantes complexos. Embora a incrustação de membranas continue a ser um desafio persistente, estratégias emergentes, como o processo aprimorado por cisalhamento vibratório, a adição de transportadores de fluidização e a aplicação de extinção de quórum biológico, têm mostrado promessas consideráveis na mitigação de incrustações de membranas. O desempenho dessas estratégias é então analisado em termos de controle de incrustações na membrana, produção de biogás e vantagens potenciais em comparação com métodos convencionais. Além disso, esta revisão fornece uma análise aprofundada de configurações inovadoras de AnMBR, nomeadamente biorreator de membrana dinâmica anaeróbia (AnDMBR), biorreator de membrana eletroquímica anaeróbia</p>	<p>Ideia do artigo: Biorreator de membrana anaeróbia (AnMBR) que integra filtração por membrana com processo Anaeróbio, alcança alta remoção de DQO (~95%) com curto tempo de retenção hidráulica, oferecendo vantagens significativas para recuperação eficiente de energia e recursos.</p> <p>Conclusões: Avaliações críticas dessas configurações são conduzidas, com foco em seu potencial para aliviar a incrustação de membranas e melhorar a remoção de poluentes.</p>
-------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>(AnEMBR), biorreator de membrana vibratória anaeróbia (AnVMBR) e biorreator de membrana osmótica anaeróbia (AnOMBR). Avaliações críticas dessas configurações são conduzidas, com foco em seu potencial para aliviar a incrustação de membranas e melhorar a remoção de poluentes. No entanto, é necessário mais trabalho para (1) explorar aplicações mais amplas, (2) desenvolver novos materiais de membrana direcionados ao processo Anaeróbio, (3) alcançar um controle mais eficiente de incrustações e remoção de poluentes através da otimização dos parâmetros operacionais, bem como (4) conduzir uma vida útil abrangente.</p>	
--	--	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

KHANAL, S. K., et al, 2021	Anaerobic digestion beyond biogas	Digestão anaeróbia além do biogás.	<p>A digestão anaeróbia (DA) é uma tecnologia amadurecida para remediação/estabilização de resíduos (água) e geração de bioenergia na forma de biogás. A tecnologia DA tem vários benefícios inerentes que vão desde a geração de energia renovável, a remediação de resíduos (água) e a redução das emissões de gases com efeito de estufa até à melhoria da saúde/higiene e do estatuto socioeconómico geral das comunidades rurais nos países em desenvolvimento. Nos últimos anos, houve uma mudança de paradigma nas aplicações da tecnologia DA além do biogás. Esta edição especial (SI) intitulada "Digestão Anaeróbia Além do Biogás" foi conceituada para incorporar alguns dos avanços recentes em DA em que a ênfase está além do biogás, como biorrefinaria anaeróbia, alongamento de cadeia, tratamento de micropoluentes , toxicidade e estabilidade do sistema, digerido como biofertilizante, sistemas bioeletroquímicos, biorreatores inovadores, sequestro de carbono, atualização de biogás, microbiomas, remediação de resíduos (água), pré-tratamento de resíduos/resíduos, adição e modelagem de promotores, controle de processos e automação , entre outros.</p>	<p>Ideia do artigo: A tecnologia DA tem vários benefícios inerentes que vão desde a geração de energia renovável, remediação de resíduos (água) e redução da emissão de gases de efeito estufa até a melhoria da saúde/higiene e da situação socioeconômica geral das comunidades rurais nos países em desenvolvimento.</p> <p>Objetivo: Foi conceituado para incorporar alguns dos avanços recentes em DA em que a ênfase vai além do biogás, como biorrefinaria anaeróbia, alongamento de cadeia, tratamento de micropoluentes, toxicidade e estabilidade de sistema, digerido como biofertilizante, sistemas bioeletroquímicos, biorreatores inovadores , sequestro de carbono, atualização de biogás, microbiomas, remediação de resíduos (água), pré-tratamento de resíduos/resíduos, adição e modelagem de promotores, controle de processos e automação, entre outros.</p>
----------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

CHANG, C., et al, 2019	A case study on the electricity generation using a micro gas turbine fuelled by biogas from a sewage treatment plant	Um estudo de caso sobre geração de eletricidade usando uma Microturbina a gás alimentada por biogás de uma estação de tratamento de esgoto.	<p>A produção combinada de calor e energia a partir do biogás desempenha agora um papel importante</p> <p>papel na utilização de energia e recursos, bem como no controle da poluição no tratamento de águas residuárias. Esta pesquisa utilizou biogás da Estação de Tratamento de Esgoto de Bali, na cidade de New Taipei, Taiwan, como principal fonte de combustível para a geração de eletricidade. Um microgerador de eletricidade com turbina a gás, Capstone CR-30, que possui uma carga de potência nominal máxima (PWL) de 30 kW, foi equipado para converter biogás em eletricidade. O biogás é composto principalmente por CH₄ (56,1 ± 8,0 vol.%), CO₂ (25,5 ± 9,8 vol.%), H₂ (0,5 vol.%) e H₂S (0,99 ± 0,07 ppmv). Durante o período de teste de operação do gerador, constatou-se que a eficiência térmica aumenta de 19,8% para 23,4% kWh/kWhth, enquanto a eficiência de geração de eletricidade (η_{EB}) também sobe de 0,93 para 1,09 kWh/m³ biogás à medida que o PWL aumenta de 10 kW a 30 kW. Os resultados indicaram que o gerador apresenta melhor desempenho com maior PWL. Em PWL = 30 kW, as concentrações médias ajustadas de CO e NOx (ajustadas para 15 vol.% O₂) emitidas pelo gerador são 86 ppmv e 17 ppmv, respectivamente. Ambos são muito inferiores aos padrões de emissão de fontes estacionárias em Taiwan de 2.000 ppmv e 150 ppmv,</p>	<p>Ideia do artigo: Se o biogás puder ser utilizado adequadamente, não apenas a intensificação do efeito estufa poderá ser desacelerada, mas o biogás também poderá ser substituído por combustíveis fósseis. Resultando em um alto valor calorífico de 17–25 MJ/m³</p> <p>Objetivo: Este estudo focou na aplicação da microturbina a gás e a operou praticamente em uma estação de tratamento de esgoto por 2 anos consecutivos.</p> <p>Resultados: A produção diária de biogás da Usina de Bali é de cerca de 4.424 m³/d. Atualmente, no entanto, cerca de 3.281 m³/d de biogás são queimados diretamente em flare, sem qualquer utilização de energia, indicando que cerca de 74,2% em volume do biogás foi desperdiçado. Os 25,8% vol. restantes de biogás são usados como combustível para caldeiras e geradores de eletricidade bicompostíveis</p> <p>Conclusões: Os resultados das operações regulares de longo prazo mostraram que a vazão de entrada de biogás e a concentração de metano desempenham um papel essencial na geração de eletricidade a biogás por um microgerador de turbina a gás.</p>
------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>respectivamente. Assim, PWL de 30 kW foi selecionado em cooperação com fluxo de biogás = 0,412 m³/min e relação ar/combustível (isto é, relação ar/biogás) = 76,0 vol./vol. para a operação regular a longo prazo. Nas condições definidas acima para operação de longo prazo, o gerador consumiu continuamente o biogás e forneceu geração de eletricidade estável a uma taxa de 19,64 kWh/h durante um período de funcionamento de 2 anos. Além disso, os gases de efeito estufa podem ser eliminados a uma taxa de 10,78 kg CO₂e/h quando se utiliza o biogás como combustível para a geração de eletricidade. No geral, esta investigação prova que a aplicação de um microgerador de eletricidade com turbina a gás não só tem um desempenho promissor na utilização de biogás, mas também proporciona uma redução significativa das emissões de gases com efeito de estufa, o que se enquadra nos conceitos de economia circular e proteção ambiental.</p>	
--	--	--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>ARIAS, A. et al, 2020</p>	<p>Linking organic matter removal and biogas yield in the environmental profile of innovative wastewater treatment technologies.</p>	<p>Vinculando a remoção de matéria orgânica e o rendimento de biogás no perfil ambiental de tecnologias inovadoras de tratamento de águas residuárias.</p>	<p>As estações de tratamento de águas residuárias (ETAR) necessitam abandonar o conceito linear e adaptar-se à filosofia circular integrando padrões de desempenho tecnológico, mas também indicadores ambientais, económicos e sociais. No entanto, esta mudança não pode ser feita apenas através da substituição de uma tecnologia, mas é necessário aplicar soluções integradas. Neste quadro, uma nova estratégia de tratamento ganhou força nos últimos anos, que consiste na recuperação da matéria orgânica (MO) no tratamento primário e na implementação do processo de nitrificação parcial-anammox como tratamento secundário. Neste estudo, três esquemas diferentes baseados nesta abordagem foram avaliados do ponto de vista ambiental e económico e comparados com uma estação de tratamento de águas residuárias convencional. Os três esquemas propostos são: i) manta de lodo anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) + lodo ativado de filme fixo integrado (IFAS); ii) lodo ativado de alta taxa (HRAS) e IFAS e, finalmente, filtro de correia rotativa (RBF) + tratamento primário aprimorado químico (CEPT) seguido por uma unidade IFAS. Embora a complexidade tecnológica e operacional seja notável nos esquemas baseados nesta estratégia, foram estimados impactos ambientais menores para as duas primeiras configurações. Contudo, o consumo de produtos químicos na terceira alternativa foi</p>	<p>Ideia do artigo: A digestão anaeróbia (DA) é um processo bem estabelecido para a estabilização e tratamento de lodo residual de tratamento de efluentes (ETE) e produz um biogás rico em metano (CH₄), que é uma valiosa fonte de energia renovável. O rendimento de biogás é influenciado por inibidores, condições operacionais e características químicas do lodo bruto que alimenta o processo DA.</p> <p>Objetivo: Determinar os efeitos da composição da matéria orgânica do lodo no valor bioenergético do lodo de esgoto tratado por MAD em grande escala.</p> <p>Conclusões: O rendimento de biogás aumentou significativamente com o conteúdo orgânico total, gordura e celulose no lodo de alimentação. O conteúdo e a decomposição de frações orgânicas no lodo de esgoto foram consideravelmente mais confiáveis em comparação com a abordagem VSR padrão para prever.</p>
------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>prejudicial para o desempenho ambiental da planta, mesmo com impactos superiores aos do esquema convencional para as categorias relacionadas à toxicidade. Neste sentido, o consumo de energia e de produtos químicos são as principais barreiras ao sucesso da sua implementação.</p>	
--	--	--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>ERGUVAN, M. et al, 2022</p>	<p>Modelling of a novel near zero energy for a wastewater treatment plant with OXY-Biogas power cycle</p>	<p>Modelagem de uma nova energia próxima de zero para águas residuárias estação de tratamento com ciclo de potência OXY-Biogás.</p>	<p>Com o aumento da população mundial, houve um crescimento significativo no consumo de energia e água, tornando o Nexus Água-Energia (WEN) uma consideração essencial nos últimos anos. Além disso, o consumo de energia aumentou nove vezes no último século, e há uma forte conexão entre a produção de eletricidade e o uso de água – sendo a geração de eletricidade uma das principais fontes de emissões de CO₂ no mundo.</p> <p>Para conservar água, energia e reduzir as emissões de CO₂, uma nova estação de tratamento de efluentes (ETE) de energia líquida zero foi modelada e desenvolvida, integrando um ciclo de potência oxi-biogás a uma ETE. O sistema proposto combina lodos ativados, digestão anaeróbia, um ciclo de potência oxi-biogás e um ciclo Rankine. O produto final do processo de lodos ativados é utilizado para alimentar os ciclos de potência e gerar energia. O CO₂ produzido na câmara de combustão é capturado e recirculado, sendo queimado junto com o biogás e oxigênio puro.</p> <p>Diversos estudos paramétricos foram conduzidos para investigar os efeitos do sistema sobre as eficiências termodinâmicas e a taxa de autossuficiência. Enquanto a carga orgânica do efluente, a demanda bioquímica de oxigênio do efluente e a concentração de oxigênio dissolvido foram variáveis analisadas na estação de</p>	<p>Ideia do artigo: Para conservar água, energia e emissões de CO₂, um novo sistema proposto foi uma combinação de lodo ativado, digestor anaeróbio, ciclo de potência de oxi-biogás e ciclo Rankine. O produto final do lodo ativado é utilizado para alimentar os ciclos de potência para produção de energia.</p> <p>Objetivo: Avaliar a integração de um modelo de combustão de oxi-biogás não só para produzir energia, mas também para uma ETE livre de emissões. Além disso, foi calculada uma análise fundamental da poupança de energia e de CO₂ para cada estado dos EUA, utilizando o sistema proposto.</p>
--------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			<p>tratamento, a temperatura de entrada da turbina, a pressão de combustão e a taxa de recirculação de CO₂ foram escolhidas como variáveis-chave do ciclo de potência, pois influenciam tanto a demanda de energia para o tratamento de efluentes quanto a geração de energia no ciclo da turbina oxi-biogás.</p> <p>A carga orgânica do efluente doméstico bruto foi identificada como o fator mais importante entre as variáveis analisadas. Além disso, a pressão de combustão demonstrou ter um papel significativo, com os melhores índices de autossuficiência e eficiência ocorrendo para pressões na faixa de 15 a 20 bar. No geral, as eficiências de exergia variaram de 19,38% a 32,59%, e as taxas de autossuficiência variaram de 82,29% a 132,4%. Além disso, mais de 95% do CO₂ foi capturado e reutilizado na câmara de combustão.</p>	
--	--	--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>FERRER, I. et al, 2024</p>	<p>Optimising sewage sludge anaerobic digestion for resource recovery in wastewater treatment plants</p>	<p>Otimizando a digestão anaeróbia de lodo de esgoto para recuperação de recursos em estações de tratamento de efluentes</p>	<p>Recuperar recursos de lodos geradas durante o tratamento de efluentes é uma oportunidade e um desafio. A digestão anaeróbia termofílica pode otimizar a produção de biogás e as propriedades dos lodos digeridos para maior valorização, no quadro de uma economia circular. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito das condições operacionais, ou seja, temperatura, concentração de sólidos no lodo e tempo de retenção de sólidos (SRT) na produção de metano, concentração de ácidos graxos voláteis (AGV), higienização do lodo digerido e desidratabilidade, durante digestão anaeróbia de longo prazo. Esta é a primeira vez que a digestão anaeróbia de lodo foi avaliada em mais de 500 dias, variando parâmetros de controle para avaliar concomitantemente os resultados de biogás, AGV e remoção de patógenos com foco na recuperação de recursos. Os resultados mostraram como, ao mudar de condições mesofílicas (38 °C) para termofílicas (55 °C), com um SRT curto (10 dias) no reator, o desempenho do processo foi otimizado. De fato, a produção de metano atingiu um máximo de 0,4 m³CH₄/m³ reator ·d, com uma concentração de AGV de 4,0 g DQO/L e remoção completa de patógenos no digerido, para uma reutilização agrícola segura. Portanto, a transição de digestores anaeróbios mesófilos para termofílicos parece benéfica para a valorização de subprodutos e para</p>	<p>Ideia do artigo: A digestão termofílica tem sido apontada há muito tempo como a mais eficiente em termos de remoção de matéria orgânica e produção de metano. Objetivo: O objetivo deste estudo é avaliar o impacto da temperatura do processo (38, 43, 50 e 55 °C), concentração de sólidos totais (ST) no afluente (2–4%) e SRT (de 35 a 10 dias) na digestão anaeróbia de lodo de esgoto.</p> <p>Conclusões: Portanto, a transição de digestores mesófilos para termofílicos parece benéfica para a valorização de subprodutos e promoção da economia circular nas ETAR municipais.</p>
-------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

			a promoção da economia circular nas estações de tratamento de efluentes.	
--	--	--	--------------------------------------------------------------------------	--

Fonte: A autora (2024)

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os métodos aplicados para a quantificação do biogás nas estações de tratamento de esgotos em estudo, os GEE evitados na atmosfera, assim como a geração de energia que poderá ser produzida com o uso do biogás.

3.1 ESTUDOS DE CASOS - ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

Este trabalho foi realizado em Estações de Tratamento de Esgotos com tratamento por via anaeróbia, localizadas na região sul do Brasil, em operação, considerando-se o tamanho e a vazão, o período avaliado foi o ano de 2023. Foi realizado um levantamento de dados com informações disponibilizadas pelas companhias, que englobam dados de operação, projeto e consulta as Licenças de Operação (LO).

3.1.1 ETE MORADA DOS EUCALIPTOS

A ETE Morada dos Eucaliptos é responsável pelo tratamento de efluentes sanitários de aproximadamente 6.000 habitantes da população de Novo Hamburgo/RS e apresenta uma vazão máxima de 864 m³/dia. A ETE possui tratamento anaeróbio com aeróbio, sendo constituída basicamente das seguintes unidades: tratamento preliminar com gradeamento grosseiro e desarenador, calha Parshall, gradeamento fino, reator UASB, filtro biológico aeróbio (aeração natural), tanque com aeração mecânica superficial, reator anóxico e emissário final (COMUSA, 2024).

Além disso, apresenta três leitos de secagem para confinamento e desidratação natural de lodo. O efluente sanitário tratado é descartado na vala de drenagem artificial que passa em frente à estação. Atualmente utiliza-se o produto químico cloreto férrico, o qual é adicionado no tanque aerado e tem a função de auxiliar na clarificação do efluente, o lodo produzido é acumulado na porção externa do reator, a qual tem função de decantador. Utiliza-se, também, quando necessário, antiespumante para minimizar e/ou evitar espumas e cal hidratada para correção de pH (COMUSA, 2024).

3.1.2 ETE VICENTINA

A ETE Vicentina (Figura 5) é responsável pelo tratamento de efluentes sanitários de aproximadamente 50 mil habitantes do município de São Leopoldo/RS e apresenta uma vazão máxima de 8.640 m³/dia. A ETE possui tratamento preliminar com gradeamento mecanizado e desarenador longitudinal, reator UASB, câmara anóxica e aeróbia, precipitação de fósforo quimicamente assistida (coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido) (SEMAE, 2024).

Além disso a disposição final do efluente tratado é através de lançamento superficial por emissário canalizado. A ETE apresenta também, centrífuga para secagem e desidratação lodo. A Licença de Operação (LO) da ETE também permite o recebimento de efluentes provenientes de manutenção de rede, elevatórias, caixa de gordura e banheiros químicos (SEMAE, 2024).

Figura 5 - ETE Vicentina



Fonte: Adaptado de SEMAE (2021).

3.1.3 ETE TEGA

A ETE Tega (Figura 6) é responsável pelo tratamento de efluentes sanitários de aproximadamente 200 mil habitantes de Caxias do Sul/RS e apresenta uma vazão máxima de 38.016 m³/dia e se estende por 34 quilômetros de rede coletora e

interceptora. A ETE possui tratamento preliminar com gradeamento mecanizado, desarenador, reator UASB, filtro biológico aerado e decantação.

Figura 6 - ETE Tega



Fonte: SILVA (2014).

3.1.4 ETE SERRARIA

A ETE Serraria é responsável pelo tratamento de efluentes sanitários de aproximadamente 1.080.000 habitantes do município de Porto Alegre/RS e apresenta uma vazão máxima de 354.240 m³/dia. A ETE possui, possui tratamento preliminar com gradeamento, peneiramento mecânico e caixa de areia aerada, sistema de precipitação de fósforo nos tanques de lodos ativados e tratamento secundário com reator UASB.

Além disso a ETE Serraria tem tratamento terciário com sistema de pós-tratamento por lodos ativados, com fases de nitrificação e desnitrificação, na modalidade UNITANK.

Figura 7 - ETE Serraria



Fonte: INFRACON (2025).

3.2 QUANTIFICAÇÃO DE BIOGÁS PRODUZIDO NAS ETES

A produção de biogás foi estimada a partir do monitoramento da vazão de entrada, DQO (Demanda Química de Oxigênio) do efluente e afluente, temperatura operacional do reator e percentual de CH₄ no biogás nas ETES que foram estudadas. Os dados como vazão e DQO foram disponibilizados pelas companhias de saneamento dos municípios de Porto Alegre (DMAE), São Leopoldo (Serviço Municipal de Água e Esgoto - SEMAE), Novo Hamburgo (COMUSA) e Caxias do Sul (SAMAE).

Os cálculos para a quantificação de biogás foram estruturados em planilha Excel e foram baseados nas metodologias de Zanette (2009), Chernicharo (2007), Lobato (2011) e Metcalf & Eddy (2016).

$$DQO_{CH_4} = Q \times (S_o - S) - Y_{obs} \times Q \times S_o$$

Equação 7

Em que:

DQO_{CH_4} = Massa diária de DQO convertida em metano (kg DQO/dia);

Q = Vazão média do efluente (m^3 /dia)

S_0 = concentração de DQO afluente (kgDQO/ m^3)

S = concentração de DQO efluente (kgDQO/ m^3)

Y_{obs} = coeficiente de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO (0,11 a 0,23 kgDQOlodo/kgDQOappl), adotado 0,18 kgDQOlodo/kgDQOappl.

Calculou-se então o fator de correção de temperatura através da equação 8.

$$K_t = \frac{P \times K}{R \times (273 + T)} \quad \text{Equação 08}$$

K_t = Fator de correção de temperatura (kg DQO/ m^3)

P = pressão atmosférica, $P = 1$ atm;

K = DQO correspondente a um mol de CH_4 , $K = 64$ g DQO/mol;

R = constante dos gases, $R = 0,08206$ atm L/mol K

T = temperatura operacional, (usou-se a temperatura do ar)

Calculou-se a vazão de biogás através da Equação 9, já que em esgotos domésticos os teores de metano variam, em geral, de 70 a 80%.

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K_t} \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

Q_{CH_4} = Produção volumétrica teórica máxima de metano (m^3 /dia);

A Equação 9 representa a produção volumétrica máxima de metano, no entanto, deve-se considerar as perdas para o sistema como diluição no efluente, vazamentos, gás residual, entre outras. Por isso, o volume de metano disponível para

recuperação de energia será calculado através das Equações 10, 11 e 12, sendo adotado os valores de perda indicados na Tabela 3, situação típica.

$$Q_{W-CH_4} = Q_{CH_4} \times p_w \quad \text{Equação 10}$$

$$Q_{O-CH_4} = Q_{CH_4} \times p_o \quad \text{Equação 11}$$

$$Q_{L-CH_4} = Q_{méd} \times p_L \times f_{CH_4} \frac{R \times (273+T)}{P \times K_{DQO}} \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

Q_{W-CH_4} = perda de metano na fase gasosa, com gás residual (m³/dia)

p_w = percentual de perda de metano na fase gasosa, com o gás residual (%)

Q_{O-CH_4} = outras perdas de metano na fase gasosa

p_o = percentual de outras perdas de metano na fase gasosa (%)

Q_{L-CH_4} = perdas de metano na fase líquida, dissolvido no efluente (m³/dia)

p_l = perda de metano na fase líquida, dissolvido no efluente (kg/m³)

$Q_{méd}$ = vazão média de esgoto afluyente ao reator (m³/dia)

F_{CH_4} = fator de conversão de massa de metano em massa de DQO
(Coeficiente estequiométrico 4 kg DQO/kg CH₄)

K_{DQO} = DQO correspondente a um mol de CH₄ (0,064 kgDQO_{CH₄/mol})

Tabela 3 - Valores e percentuais de perda de metano em relação ao metano produzido

Tipo de perda de metano	Unidade	Situação		
		Melhor	Típica	Pior
Perda com gás residual (p_w)*	%	2,5	5,0	7,5
Outras perdas (p_o)*	%	2,5	5,0	7,5
Perda com o efluente (p_L)	Mg/L	15	20	25

*Percentuais de perdas relativos à produção volumétrica teórica máxima de metano

Fonte: Lobato (2011).

Após os cálculos de perda será possível estimar a produção real de metano efetivamente disponível para a recuperação de energia conforme Equação 13.

$$Q_{real-CH_4} = Q_{CH_4} - Q_{w-CH_4} - Q_{o-CH_4} - Q_{L-CH_4} \quad \text{Equação 13}$$

Em que:

$Q_{real-CH_4}$ = produção real de metano disponível para recuperação de energia (m³/dia)

Para determinar a vazão normal de biogás, usou-se a metodologia de Cabral (2016), com os dados de vazão volumétrica medida e com os dados da vazão real, temperatura e pressão conforme equação 14 e equação 15.

$$Q_{nv} = \frac{Q_v \times P_{gás} \times T_n}{T \times P_n} \quad \text{Equação 14}$$

$$Q_{nr} = \frac{Q_{real-CH_4} \times P_{gás} \times T_n}{T \times P_n} \quad \text{Equação 15}$$

Em que:

Q_{nv} = Vazão normal de biogás baseada na vazão volumétrica (Nm³/h)

Q_{nr} = Vazão normal de biogás baseada da vazão real (Nm³/h)

Q_v = Vazão volumétrica (m³/h)

$Q_{real-CH_4}$ = produção real de metano disponível para recuperação de energia (m³/dia)

$P_{gás}$ = Pressão na linha de gás (adotou-se 1013,25 mbar)

T_n = Temperatura nas condições normalizadas (213 K)

T = Temperatura do gás (K)

P_n = Pressão nas condições normalizadas (1013,25 mbar)

3.3 ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE METANO EVITADA

A metodologia adotada para estimar as emissões de metano provenientes do tratamento de esgoto sanitário teve como base a vazão real de metano (m^3/dia) gerado em cada ETE, previamente calculada pela equação 13. Essa abordagem permite uma análise mais próxima da realidade operacional das ETEs, uma vez que considera diretamente o volume de gás produzido, sem a necessidade de estimativas baseadas na carga orgânica afluente.

A conversão da vazão de metano para massa foi realizada utilizando a densidade do CH_4 a 0°C e 1 atm, igual a $0,7168 \text{ kg/m}^3$, multiplicando-se esse valor pela vazão diária e pelos 365 dias do ano. O resultado obtido corresponde à massa anual de metano emitida por cada ETE, expressa em quilogramas por ano (kg/ano).

Para mensurar o impacto climático das emissões, os valores obtidos foram convertidos em dióxido de carbono equivalente (CO_2e) utilizando o Potencial de Aquecimento Global do metano de 28 vezes, conforme estabelecido no Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2013). A conversão foi feita multiplicando-se a massa anual de CH_4 por 28 e dividindo-se o resultado por 1.000, resultando na emissão anual em toneladas de CO_2 equivalente ($\text{t CO}_2\text{e/ano}$).

Além disso, foi avaliado o potencial de aproveitamento energético do metano disponível nas ETEs, considerando sua utilização para geração de energia elétrica. Para essa estimativa, utilizou-se o poder calorífico inferior (PCI) do metano, igual a 35 MJ/m^3 , com conversão para energia elétrica pela equivalência de $1 \text{ MJ} = 0,278 \text{ kWh}$. Assumiu-se uma eficiência de conversão de 25%, típica de grupos geradores operando em Ciclo Otto, comumente utilizados em instalações de biogás. Com esses parâmetros, foi possível estimar a energia elétrica anual (em kWh/ano) que poderia ser gerada a partir da vazão de metano disponível em cada ETE.

Para avaliar os impactos ambientais de um possível aproveitamento energético, foi considerado o fator de emissão médio da energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN), correspondente a $0,040 \text{ t CO}_2\text{e}$ por MWh , conforme dados do Inventário Nacional de Emissões e da ferramenta do GHG Protocol Brasil. A substituição da energia da rede por energia gerada a partir do biogás permitiria evitar emissões equivalentes a esse fator multiplicado pela quantidade de energia elétrica gerada. Essa estimativa foi utilizada para comparar dois cenários.

No Cenário 1, assumiu-se que todo o metano gerado é queimado em *flare*, sem recuperação energética, sendo contabilizado como emissão direta de GEE. Já no Cenário 2, considerou-se o aproveitamento do metano para geração de energia elétrica, resultando em emissões evitadas pela substituição de energia da rede. Por fim, a redução líquida de emissões foi obtida pela diferença entre as emissões do Cenário 1 e as emissões evitadas no Cenário 2.

3.4 POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOGÁS

O potencial energético de biogás foi estimado através da metodologia de Rosa (2016), pela multiplicação da vazão normal média de cada ETE, concentração de metano e poder calorífico inferior da combustão de metano (Equação 16).

$$PE = Q_{n\ real-CH_4} \times PC_i \quad \text{Equação 16}$$

Em que:

PE = potencial energético do biogás (MJ/dia)

$Q_{n\ real-CH_4}$ = produção real de metano disponível para recuperação de energia (Nm³/dia)

PC_i = Poder calorífico inferior da combustão de metano (35 MJ/Nm³)

E a partir do potencial através da Equação 15, multiplicou-se o valor de eficiência de 25% para a conversão de máquinas térmicas com grupos geradores (Ciclo Otto) e transformou-se para kWh através da constante de conversão de MJ para kWh, sendo assim obtido o valor de energia elétrica total disponibilizada pelo biogás (ZILLOTI, 2012), conforme a Equação 16.

$$E_e = PE \times 0,25 \times K \quad \text{Equação 17}$$

E_e = energia elétrica disponibilizada pelo biogás (kWh/dia)

PE = Potencial energético do biogás (MJ/dia)

K = Constante de conversão entre MJ para kWh (0,278)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 QUANTIFICAÇÃO DE BIOGÁS

Os dados de caracterização do efluente de cada Estação de tratamento de esgotos em estudo como vazão, DQO do efluente bruto e tratado, vazão estimada de biogás calculada pelas equações 7, 8 e 9, as perdas por diluição (equação 10), perda por vazamento (equação 11) e outras perdas (equação 12) e a vazão real de biogás (equação 13), vazão normal de biogás calculada pela equação 14, assim como suas máximas, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação são apresentadas nas tabelas 4 a 11. Os dados referentes aos tratamentos foram disponibilizados pelas respectivas Estações de Tratamento e os *outliers* foram removidos da análise e interpretação de resultados.

Com base nesses dados, o período avaliado foi o ano de 2023 e entre as Estações selecionadas para o estudo, a ETE Morada dos Eucaliptos é a menor em termos de vazão média de entrada de afluente, seguida da ETE Vicentina, ETE Tega e ETE Serraria. Os comparativos das Estações analisadas estão resumidos no Quadro 6 e serão discutidas detalhadamente no item 4.1.5 Comparativo das ETEs.

Quadro 6 - Comparativo das ETEs em estudo

	ETE Morada dos Eucaliptos	ETE Vicentina	ETE Tega	ETE Serraria
Localização	Novo Hamburgo	São Leopoldo	Caxias do Sul	Porto Alegre
Vazão média (m³/dia)	716,84	4.115,96	9.887,95	125.633,55
População atendida	6.000	50.000	200.000	1.080.000

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

4.1.1 ETE Morada dos Eucaliptos

Os dados de caracterização da ETE Morada dos Eucaliptos foram analisado e estão dispostos na Tabela 4, os dados referentes ao biogás na Tabela 5 e o Gráfico 1 vazão de gás estimado e efluente.

Tabela 4 - Dados operacionais ETE Morada dos Eucaliptos (n=328)

	Vazão (m³/dia)	DQO bruto (mg/L)	DQO tratado (mg/L)
Média	716,84	448,56	122,93
Mínimo	151,79	277,00	58,00
Máximo	1090,18	703,00	234,00
DP	181,24	119,19	48,30
CV (%)	25,28	26,60	39,34

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A ETE Morada dos Eucaliptos apresentou uma vazão média no ano de 2023 de 716,84 m³/dia com um desvio padrão de 181,24 e coeficiente de variação de aproximadamente 25%. Em relação a carga orgânica, a média do DQO bruto foi de 448,56 mg/L, a eficiência média do sistema foi de aproximadamente 73% o que comprova uma taxa de remoção maior que o esperado, já que segundo Chernicharo, 2007 a eficiência média de um reator UASB fica entre 55-70%.

Tabela 5 - Quantificação de biogás na ETE Morada dos Eucaliptos

Vazão de gás estimada (m³/dia)	Vazão de metano (Q_{nv}) (Nm³/dia)	Perdas com o efluente (Q_l) (m³/dia)	Perda de metano na fase gasosa (Q_w) (m³/dia)	Outras perdas (Q_o) (m³/dia)	Q real de metano (m³/dia)	Vazão de metano (Q_{nr}) (Nm³/dia)
----------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------

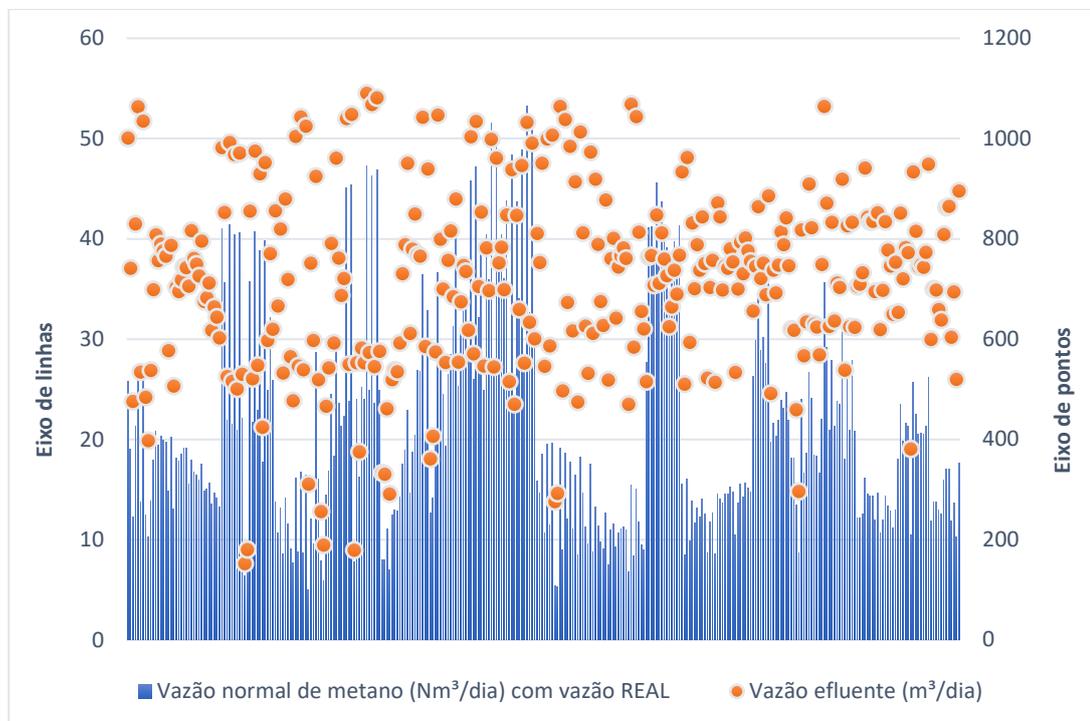
dia	87,66	63,73	26,01	4,38	4,38	28,95	21,07
imo	19,87	14,80	5,75	0,99	0,99	6,85	4,98
imo	206,12	152,61	60,03	10,31	10,31	71,96	53,28
P	42,95	31,68	12,57	2,15	2,15	14,89	31,68
(%)	49,00	49,72	48,35	49,00	49,00	54,33	52,33

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A vazão real de metano foi de 28,95 m³/dia, sendo assim um potencial médio de produção de metano de 0,04 m³ para cada m³ de esgoto. Além disso, foi calculado também o potencial de produção de metano por kg de DQO removido, a ETE obteve 0,124 m³ de metano a cada kg de DQO removido.

Compara-se este valor a outras estações de tratamento como a ETE Barra, localizada no município de Barra dos Coqueiros (SE) com vazão média de entrada de efluente de 597,80 m³/dia e DQO bruto de 329,83 mg/L, estação de porte e operação similar a essa em estudo. Neste estudo Maia (2020) calculou a vazão de metano através do *software* ProBio 1.0 três cenários, conservador com 15,4% do seu DQO convertido em metano, típico com 25,5% do seu DQO convertido em metano e otimista com 36,5 do seu DQO convertido em metano. A produção de metano por metro cúbico de esgoto da ETE Morada dos Eucaliptos apresentou resultado similar ao cenário otimista de Maia (2020), que obteve uma vazão de metano de 27,5 m³/dia com potencial médio de 0,04 m³ de metano por m³ de esgoto tratado.

Gráfico 1 – ETE Morada dos Eucaliptos - Vazão: Gás estimada x efluente



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Com base no Gráfico 1 apresentado, é possível observar o comportamento comparativo entre a vazão normalizada de metano (Nm^3/dia) e a vazão de efluente tratado (m^3/dia) ao longo do tempo. A análise dos dados demonstra que, embora a vazão de efluente mantenha uma tendência relativamente estável, com pequenas flutuações em torno de 700 a 900 m^3/dia , a vazão de metano apresenta alta variabilidade, com picos intermitentes e quedas em diversos momentos.

4.1.2 ETE Vicentina

Os dados de caracterização da ETE Vicentina estão dispostos na Tabela 6, os dados referentes ao biogás na Tabela 7 e o Gráfico 2 com vazão de gás estimada e efluente.

Tabela 6 - Dados operacionais ETE Vicentina (n=317)

	Vazão (m³/dia)	DQO Bruto (mg/L)	DQO Tratado (mg/L)
Média	4.115,96	278,69	10,87
Mínimo	525,00	102,67	3,90
Máximo	6.159,00	416,67	24,77
DP	979,88	81,37	5,95
CV (%)	23,81	29,20	54,70

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A ETE Vicentina apresentou uma vazão média no ano de 2023 de 4.115,96 m³/dia com um desvio padrão de 979,88 e coeficiente de variação de aproximadamente 24%. Em relação a carga orgânica, a média do DQO bruto foi de 278,69 mg/L, a eficiência média do sistema foi de aproximadamente 61%.

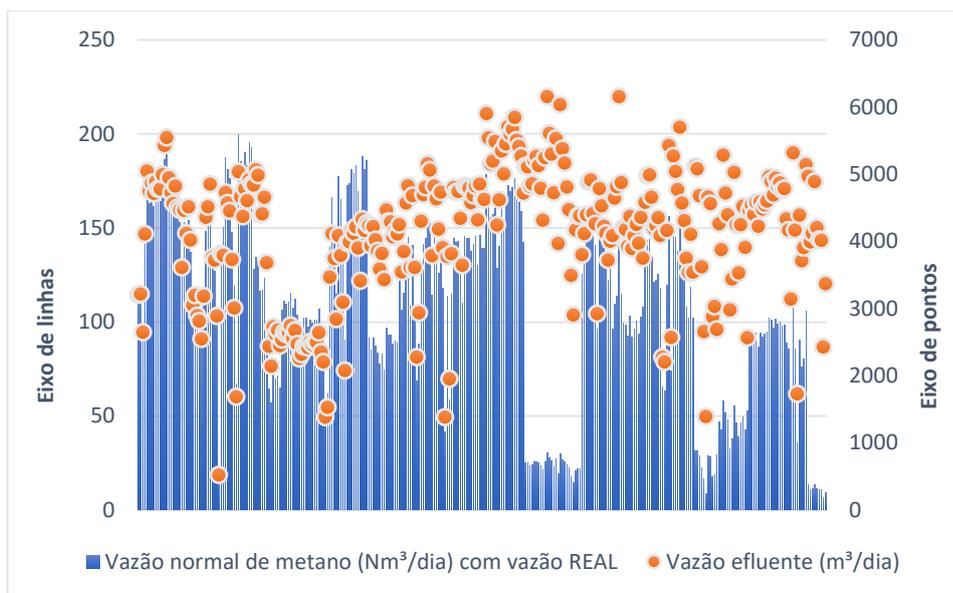
Tabela 7 - Quantificação de biogás na ETE Vicentina

	Vazão de gás estimada (m³/dia)	Vazão de metano (Q_{nv}) (Nm³/dia)	Perdas com o efluente (Q_l) (m³/dia)	Perda de metano na fase gasosa (Q_w) (m³/dia)	Outras perdas (Q_o) (m³/dia)	Q real de metano (m³/dia)	Vazão de metano (Q_{nr}) (Nm³/dia)
Média	244,20	174,38	73,39	12,21	12,21	146,40	104,55
Mínimo	15,67	11,12	4,71	0,78	0,78	9,39	6,67
Máximo	477,74	355,61	145,43	23,89	23,89	284,54	199,89
DP	117,21	83,08	35,37	5,88	5,88	70,31	49,74

CV (%)	48,00	47,64	48,19	48,15	48,15	48,03	47,57
--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Gráfico 2 - ETE Vicentina - Vazão: Gás estimada x efluente



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A vazão média estimada de biogás foi de 244,20 m³/dia, o que corresponde a um potencial médio de produção de 0,06 m³ de biogás por metro cúbico de esgoto tratado. Considerando a vazão real de metano (146,4 m³/dia), o potencial médio de produção foi de 0,035 m³ de metano por metro cúbico de esgoto. Além disso, foi calculado também o potencial de produção de metano por kg de DQO removido, a ETE obteve 0,133 m³ de metano a cada kg de DQO removido.

Ao comparar esses valores com o estudo de Pereira (2022), que realizou 4 medições *in loco* na mesma ETE durante um período de dois meses, observa-se uma diferença, a autora registrou uma produção de 0,1921 m³ de biogás por metro cúbico de esgoto, com uma vazão de biogás de 901,48 m³/dia, valores consideravelmente superiores aos obtidos neste trabalho.

Alguns fatores que podem ser relevantes foi o período de doze meses com diferentes temperaturas e estações do ano, enquanto Pereira (2022) obteve seu estudo *in loco* durante os meses de outubro e novembro com temperaturas ambiente estáveis e um dia de precipitação, além disso, trata-se da comparação entre abordagem teórica e dados empíricos. No Gráfico 2, pode-se conferir a variação da vazão efluente e de biogás estimada durante o período analisado. Observa-se que, apesar da tendência geral de estabilidade na vazão de efluente concentrando-se majoritariamente entre 3.000 e 5.000 m³/dia, a produção de metano apresenta oscilações, com períodos de alta produtividade intercalados por quedas, inclusive momentos de quase inatividade na geração de biogás.

4.1.3 ETE Tega

Os dados de caracterização da ETE Tega estão dispostos na Tabela 8, os dados referentes ao biogás na Tabela 9 e o Gráfico 3 com vazão de gás estimada e efluente.

Tabela 8 - Dados operacionais ETE Tega (n= 46)

	Vazão (m³/dia)	DQO Bruto (mg/L)	DQO Tratado (mg/L)
Média	9887,95	164,23	5,80
Mínimo	6426,43	44,80	1,34
Máximo	16191,62	385,30	11,66
DP	2622,19	65,50	2,70
CV (%)	26,52	39,88	46,60

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A ETE Tega apresentou uma vazão média no ano de 2023 de 9.887,95 m³/dia com um desvio padrão de 2.622,19 e coeficiente de variação de aproximadamente

27%. Em relação a carga orgânica, a ETE Tega apresenta um efluente com baixa carga com DQO bruto médio de 164,23 mg/L, a eficiência média do sistema foi de aproximadamente 65%, dentro do esperado de acordo com Chernicharo (2007).

Tabela 9 - Quantificação de biogás na ETE Tega

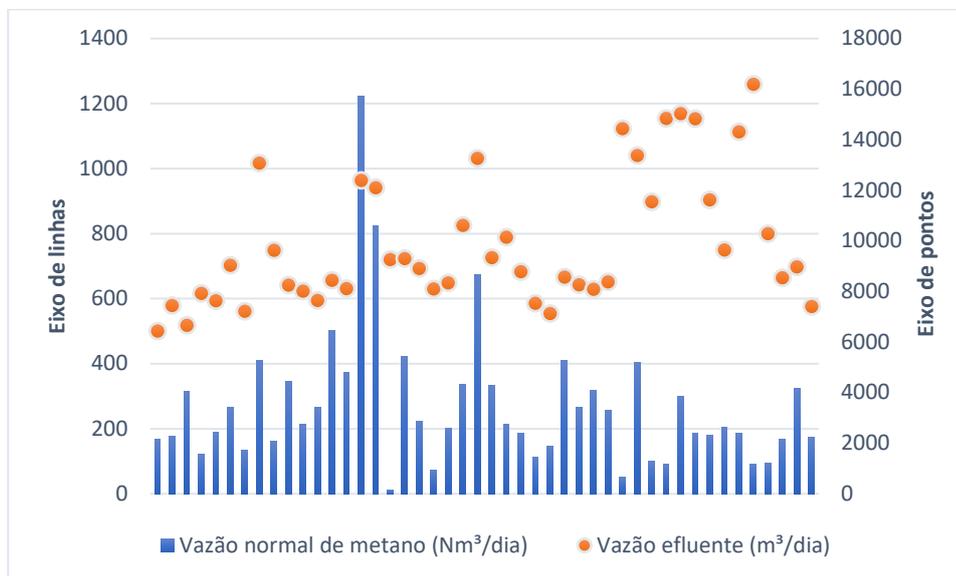
	Vazão de gás estimada (m³/dia)	Vazão normal de metano (Qnv) (Nm³/dia)	Perdas com o efluente (QI)	Perda de metano na fase gasosa (Qw)	Outras perdas (Qo)	Q real de metano (m³/dia)	Vazão normal de metano (Qnr) (Nm³/dia)
Média	278,01	278,01	2896,10	18,33	18,33	-2566,16	-1889,02
Mínimo	16,57	12,43	1909,43	0,83	0,83	-4695,67	-3408,92
Máximo	1666,04	1223,68	4809,23	83,30	83,30	-1609,02	-1150,07
DP	286,44	211,35	768,71	14,32	14,32	771,79	566,84
CV (%)	103,03	78,25%	26,54	78,13	78,13	-30,08	-30,01%

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A vazão estimada de biogás média foi de 278,01 m³/dia, sendo assim um potencial médio de produção de biogás de 0,028 m³ para cada m³ de esgoto. No entanto quando se compara a estimativa de biogás gerada com as perdas de metano, verifica-se que o tratamento gera biogás, mas mais perde do que gera.

A faixa de concentração típica de DQO varia de 450 – 800 mg/L segundo Von Sperling (2007) e a ETE Tega apresentou DQO bruto médio de 164,23 mg/L, o que demonstra que o efluente entra na estação diluído já que a ETE possui a maioria do sistema misto com a drenagem pluvial e pode-se também verificar este fator através dos altos valores de perdas com efluente (QI), sua média ficou em 2896,10 m³/dia.

Gráfico 3 - ETE Tega - Vazão: Gás estimada x efluente



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A partir da análise do gráfico, observa-se que a vazão de efluente tratado apresenta uma distribuição relativamente estável, com a maioria dos valores variando entre 7.000 e 14.000 m³/dia. Por outro lado, a vazão de metano se mostra bastante irregular, com amplitudes significativas e uma quantidade de registros com baixos volumes ou mesmo ausência de produção. Embora existam alguns picos isolados de geração de metano, não há uma correspondência direta com os pontos de maior vazão do efluente, o que evidencia que o volume de esgoto tratado não está diretamente relacionado à quantidade de biogás gerado

4.1.4 ETE Serraria

Os dados de caracterização da ETE Serraria estão dispostos na Tabela 10, os dados referentes ao biogás na Tabela 11 e o Gráfico 4 com vazão de gás estimada e efluente.

Tabela 10 - Dados operacionais ETE Serraria (n=364)

	Vazão (m³/dia)	DQO Bruto (mg/L)	DQO Tratado (mg/L)
Média	125.633,55	285,34	44,69
Mínimo	11694,00	105,00	15,00
Máximo	226020,00	548,00	83,00
DP	31344,91	82,72	12,60
CV (%)	24,95	28,99	28,20

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A ETE Serraria, é a maior das ETEs em estudo e apresentou uma vazão média no ano de 2023 de 125.633,55 m³/dia com um desvio padrão de 31.344,91 e coeficiente de variação de aproximadamente 25%. Em relação a carga orgânica, a ETE Serraria apresenta um efluente com DQO bruto médio de 285,34 mg/L, a eficiência média do sistema foi de aproximadamente 84% o que comprova uma taxa de remoção maior que o esperado segundo Chernicharo (2007).

Tabela 11 - Quantificação de biogás na ETE Serraria

	Vazão de gás estimada (m³/dia)	Vazão normal de metano (Nm³/dia)	Perdas com o efluente (QI) (m³/dia)	Perda de metano na fase gasosa (Qw) (m³/dia)	Outras perdas (Qo) (m³/dia)	Q real de metano (m³/dia)	Vazão normal de metano (Nm³/dia)
Média	11637,36	8438,37	3461,44	581,87	581,87	7012,18	5085,19
Mínimo	1943,97	1407,13	428,09	1591,00	72,23	872,08	847,25

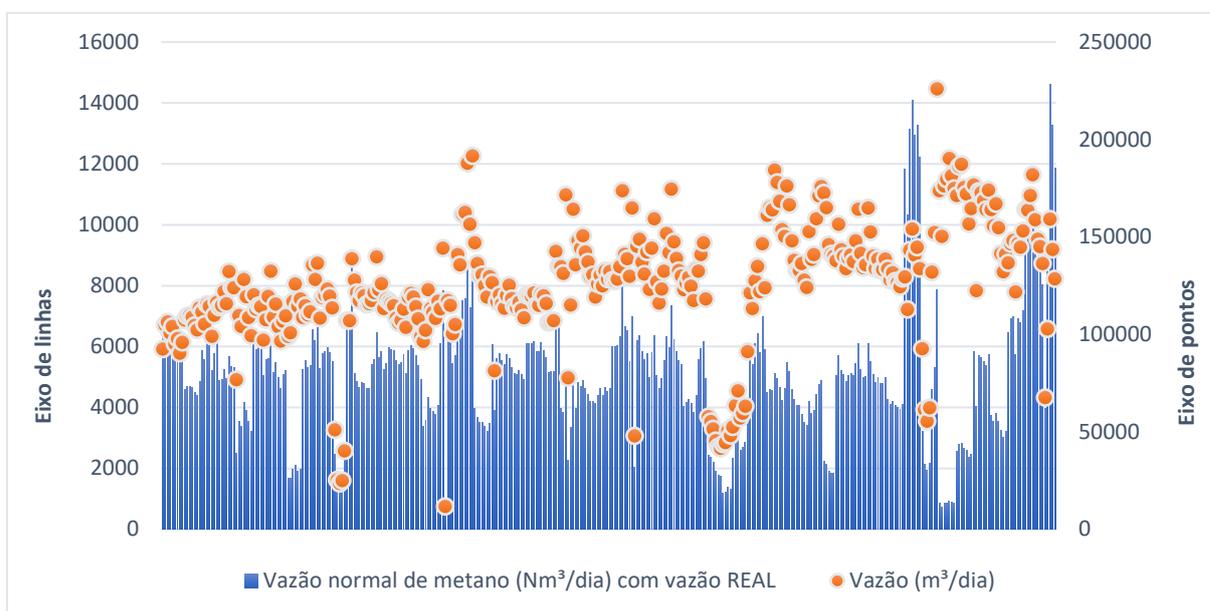
Máximo	34153,05	24429,85	10295,38	72,23	1707,65	20442,36	14622,52
DP	8032,00	5739,35	1470,86	245,60	245,60	2951,59	3433,86
CV (%)	69,02	68,01	42,49	42,21	42,21	42,09	67,53

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A vazão estimada de biogás média foi de 11.637,36 m³/dia, sendo assim um potencial médio de produção de biogás de 0,09 m³ para cada m³ de esgoto. Já o potencial de produção de metano considerando a vazão real foi de 0,06 m³ de metano por m³ de esgoto.

Compara-se este valor a outras estações de tratamento como a ETE Ribeirão, localizada no município de Ribeirão Preto (SP) com capacidade de vazão efluente de 125.280 m³/dia e 8.000 m³/dia de biogás, com 65% de metano, seu potencial de biogás fica em 0,06 m³ de biogás para cada m³ de esgoto tratado (FIEP, 2021).

Gráfico 4 - ETE Serraria - Vazão: Gás estimado x efluente



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Observa-se através do Gráfico 4 que, embora a vazão de esgoto se mantenha em uma faixa relativamente estável concentrando-se principalmente entre 100.000 e

180.000 m³/dia, a produção de metano apresenta grande variabilidade, com picos frequentes e quedas bruscas, inclusive períodos de produção praticamente nula.

4.1.5 Comparativo das estações

As estações estudadas foram organizadas de acordo com a vazão de esgoto tratado, conforme já mencionado anteriormente: a ETE Morada dos Eucaliptos possui a menor vazão, seguida pela ETE Vicentina, ETE Tega e, por fim, a ETE Serraria, com a maior vazão. No entanto, ao analisar o potencial de produção de metano, a ETE Tega se destaca como a unidade com menor geração específica de metano por esgoto tratado, o que pode estar relacionado à significativa influência de águas pluviais no sistema, resultando em maior diluição da carga orgânica. Em seguida, observa-se a ETE Morada dos Eucaliptos (0,040 m³ CH₄/m³), enquanto as ETEs Vicentina e Serraria apresentam valores equivalentes, ambas com 0,06 metros cúbicos de metano por metro cúbico de esgoto tratado. Esses dados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Tabela comparativa de indicadores

ETE	Vazão (m ³ /dia)	Vazão de metano (Nm ³ /dia)	Q real (m ³ /dia)	m ³ de metano / m ³ de esgoto	m ³ de metano / kg de DQO removido
Morada dos Eucaliptos	717	21,07	28,95	0,040	0,124
Vicentina	4.116	104,55	146,40	0,060	0,133
Tega	9.888	-1889,02	-2.566	0,028	-1,640
Serraria	125.634	5085,19	7.012	0,060	0,232

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A análise da produção específica por carga orgânica removida também mostra diferenças importantes entre as estações. Mesmo em casos de rendimento volumétrico semelhantes, como observado entre a ETE Vicentina e a ETE Serraria

(ambas com 0,060 m³ CH₄/m³ esgoto), os valores de eficiência na conversão da matéria orgânica diferem. A ETE Serraria apresenta o maior valor de produção de metano por quilograma de DQO removida, com 0,232 m³ CH₄/kg DQO, enquanto a ETE Vicentina apresenta 0,133 m³ CH₄/kg DQO. Isso evidencia que a simples análise da vazão ou da produção volumétrica não é suficiente para avaliar o desempenho energético de uma estação.

A Estação Serraria se destaca por converter de forma mais eficiente a carga orgânica presente no esgoto em metano, o que pode estar relacionado à menor diluição do efluente, à qualidade do processo de digestão anaeróbia ou à operação mais estável do sistema. Por outro lado, a ETE Morada dos Eucaliptos apresentou o menor rendimento específico (0,124 m³ CH₄/kg DQO), o que sugere um aproveitamento mais limitado do potencial energético do esgoto.

A ETE Tega apresentou valor negativo de produção de metano devido ao alto valor de perda no efluente e com o valor negativo entende-se que o metano da estação não pode ser aproveitado, sem mudanças no sistema.

4.2 EMISSÃO EVITADA DE GASES DO EFEITO ESTUFA

A emissão evitada de GEE das ETES estão indicados na Tabela 13 e considera como cenário 1 que todo metano gerado nas ETES é queimado em *flare*, sem recuperação energética, o que resulta em emissões diretas de gases de efeito estufa. E considera como cenário 2 a utilização do metano para geração de energia elétrica e ainda substitui a energia elétrica convencional, cuja geração, embora relativamente limpa no Brasil, ainda possui um fator médio de emissão de 0,040 t Co_{2e} por MWh (BRASIL, 2024).

Tabela 13 - Emissão evitada de metano das ETES

ETE	CH ₄ (kg/hab.ano)	Emissões em CO _{2e} (t/ano) Cenário 1	Emissões em CO _{2e} (t/ano) Cenário 2	Redução líquida (tCO _{2e} /ano)
ETE Morada dos Eucaliptos	1,26	212,08	1,03	211,05 (99,5%)

ETE Vicentina	0,77	1.072,48	5,2	1.067,28 (99,5%)
ETE Tega		-		
ETE Serraria	1,70	51.367,78	249,03	51.118,75 (99,5%)

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Ao observar a emissão de metano por habitante, nota-se que a ETE Serraria apresenta o maior valor absoluto (1,70 kg/hab.ano), seguido por Morada dos Eucaliptos (1,26 kg/hab.ano), e Vicentina com o menor índice (0,77 kg/hab.ano). Essas diferenças podem estar associadas ao grau de eficiência de remoção da carga orgânica, e variações no consumo de água e geração de esgoto das populações atendidas.

Esses indicadores demonstram que, mesmo entre ETEs com portes distintos, é possível identificar variações significativas de desempenho quando os resultados são relacionados à população e à carga hidráulica tratada. Essas métricas são essenciais para a priorização de investimentos em tecnologias de recuperação energética e podem contribuir para a elaboração de políticas públicas voltadas à gestão eficiente de resíduos e à mitigação de emissões.

Além disso, a análise comparativa entre os cenários de queima (Cenário 1) e aproveitamento energético (Cenário 2) mostrou que, embora o impacto climático evitado pela substituição da energia da rede não represente a totalidade das emissões de metano, há uma redução líquida significativa. Na ETE Serraria, mais de 51 mil toneladas de CO₂ equivalente poderiam ser compensadas anualmente, reforçando o potencial do biogás como fonte renovável estratégica, assim como a comercialização de créditos de carbono gerados para empresas interessadas em compensar ou neutralizar suas emissões de gases de efeito estufa na atmosfera.

4.3 GERAÇÃO DE ENERGIA

O potencial energético (PE) de biogás das estações e a energia elétrica (Ee) disponibilizada a partir de um conjunto motogerador de 25% de rendimento de conversão foram estimados através das Equações 15 e 16, respectivamente, e os resultados foram compilados na Tabela 14.

Tabela 14 - Potencial energético

ETE	PE (MJ/dia)	Ee (kWh/dia)
ETE Morada dos Eucaliptos	1.013,38	70,43
ETE Vicentina	5.132,84	356,11
ETE Tega	-	-
ETE Serraria	245.426,26	17.057,14

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

No Rio Grande do Sul, o consumo médio per capita de energia em 2022 ficou em 2.653 kWh/hab.ano (EPE, 2023), ou seja, por mês os gaúchos consumiram 221,08 kWh/hab.mês. A ETE com menor geração de energia, ETE Morada dos Eucaliptos, geraria 70,43 kWh/dia ou 2.112,9 kWh/mês, energia suficiente para suprir a necessidade de nove habitantes.

A ETE Vicentina, segunda ETE com maior geração deste estudo, supriria a demanda de 48 habitantes no mês, diferente do estudo de Pereira (2022), que estima a geração de 214 habitantes no mês. Pereira (2022) estimou uma geração média de biogás de 868 m³/dia enquanto neste estudo estimou-se a vazão média de 244 m³/dia considerando as perdas gasosas, líquidas e outras. Além disso, o percentual de metano neste estudo ficou em 75%, enquanto no estudo de Pereira (2022) estimou-se 85%.

A ETE Tega apresentou um efluente bastante diluído, o que resultou em uma perda significativa de carga orgânica no efluente final e, conseqüentemente, em um valor negativo de potencial energético. O sistema de coleta da região possui seu sistema majoritariamente misto com o sistema de drenagem pluvial, o que explica a diluição observada. Essa condição compromete diretamente a viabilidade de propostas de aproveitamento energético do biogás gerado, uma vez que a baixa carga orgânica disponível limita significativamente o potencial de produção.

Já a ETE Serraria, a maior ETE deste estudo, estimou-se sua geração em 17.057,14 kWh/dia, o que supriria a demanda de energia de 2.314 habitantes por mês em sua capacidade média. Os resultados foram comparados a demanda per capita

de energia do estado do Rio Grande do Sul, no entanto cada estação consegue utilizar a energia para o próprio consumo, reduzindo os custos de operação. Por exemplo, a ETE Serraria poderia reduzir seu custo operacional em R\$ 1.734.000,00 reais por mês, considerando o valor de US\$ 17,66 kWmês (GUAÍBA, 2025) e cotação do dólar americano R\$5,76.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aumento expressivo dos serviços de coleta e tratamento de esgoto previsto para as próximas décadas no Brasil exige a maximização contínua da eficiência operacional das ETEs e da remoção da carga poluidora, assegurando o destino ambientalmente adequado dos subprodutos e a viabilidade financeira dos empreendimentos.

Neste contexto, a gestão do metano gerado em reatores anaeróbios representa uma possibilidade de recuperação energética nas ETEs. Os resultados obtidos evidenciam diferenças relevantes entre as unidades analisadas quanto à produção de metano por metro cúbico de esgoto tratado e por quilograma de DQO removida. A ETE Serraria apresentou o maior rendimento específico de metano por carga orgânica removida ($0,232 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$), enquanto a ETE Tega apresentou valores negativos, associados à elevada diluição do esgoto em razão da contribuição de águas pluviais.

As perdas identificadas nas fases líquida, gasosa e outras interferem diretamente na estimativa do potencial de aproveitamento energético. A comparação entre as vazões estimadas (Equação 9) e a vazão real de metano (Equação 13) mostrou que parte significativa do biogás gerado pode não ser aproveitada sem adequações técnicas.

A análise de emissões evitadas apontou que a substituição da energia elétrica convencional por energia gerada a partir do metano pode reduzir de forma expressiva o impacto climático das ETEs. A maior redução líquida estimada foi na ETE Serraria, com mais de 51 mil toneladas de CO_2 equivalente ao ano. Esta comparação entre cenários reforça a relevância do aproveitamento energético na mitigação de emissões de gases de efeito estufa.

A estimativa de geração de energia elétrica a partir do biogás indicou que as ETEs podem suprir parte do seu próprio consumo energético, com variações proporcionais à vazão e à carga orgânica do esgoto tratado. A ETE Serraria apresentou o maior potencial, podendo atender o equivalente ao consumo mensal de aproximadamente 2.300 habitantes, considerando dados médios do estado do Rio Grande do Sul.

Portanto, mesmo entre ETEs de portes distintos, é possível identificar oportunidades para o aproveitamento energético do metano. A adoção de estratégias voltadas à

redução de perdas e à recuperação de energia contribui para a eficiência global do sistema de tratamento e se alinha a objetivos como a ampliação do acesso ao saneamento (ODS 6), a transição energética (ODS 7) e a mitigação de emissões (ODS 13), sem implicar em alterações estruturais significativas nas unidades estudadas, contribuindo para a resiliência urbana.

REFERÊNCIAS

- Abdelrahman AM, Kosar S, Gulhan H, Cicekalan B, Ucas G, Atli E, Guven H, Ozgun H, Ozturk I, Koyuncu I, van Lier JB, Volcke EIP, Ersahin ME. Impact of primary treatment methods on sludge characteristics and digestibility, and wastewater treatment plant-wide economics. *Water Res.* 2023 May 15;235:119920. doi: 10.1016/j.watres.2023.119920. Epub 2023 Mar 28. PMID: 37003116.
- ACHINAS, Spyridon; EUVERINK, Gerrit Jan Willem. Feasibility study of biogas production from hardly degradable material in co-inoculated bioreactor. *Energies*, v. 12, n. 6, p. 1040, 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Levantamento da ANA aponta aumento expressivo no número de estações de tratamento de esgotos no Brasil. Brasília: ANA, 2019.** Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/levantamento-da-ana-aponta-aumento-expressivo-no-numero-de-estacoes-de-tratamento-de-esgotos-no-brasil>. Acesso em: 23 out. 2024.
- ARIAS, A., Behera, C. R., Feijoo, G., Sin, G., & Moreira, M. T. (2020). Unravelling the environmental and economic impacts of innovative technologies for the enhancement of biogas production and sludge management in wastewater systems. *Journal of Environmental Management*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110965>
- ARIAS, A.; FEIJOO, G.; MOREIRA, M. T. Linking organic matter removal and biogas yield in the environmental profile of innovative wastewater treatment technologies. *Journal of Cleaner Production*, v. 276, p. 124292, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS (ABIOGÁS). **Potencial de produção de biogás a partir do tratamento do esgoto:** perspectivas para a universalização sustentável dos serviços de esgotamento sanitário no Brasil. São Paulo: ABIOGÁS, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS (ABIOGÁS). **Transporte de biogás: guia técnico.** Brasília: ABIOGÁS, 2020.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. Manual de Saneamento. Ministério da Saúde. Brasília, DF: Ministério Nacional da Saúde, 2019. Disponível em: https://repositorio.funasa.gov.br/bitstream/handle/123456789/506/Manual_de_Saneamento_Funasa_5a_Edicao.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: ago. 2024
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>. Acesso em: 23 out. 2024

BRASIL. Ministério das cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Brasília, DF: Ministério das cidades, 2017.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretária Nacional de Saneamento. Plano Nacional de Saneamento Básico: **PLANSAB: relatório de avaliação anual 2021**. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional: Secretária Nacional de Saneamento abr. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/plano-nacional-de-saneamento-basico-plansab/arquivos/relatriodeavaliaoanualdoplansab2021.pdf>. Acesso em: ago. 2024.

BRASIL. Ministério das Cidades. PLANSAB - Plano Nacional de Saneamento Básico. Plano Nacional de Saneamento Básico: mais saúde com qualidade de vida e cidadania. Brasília - DF, 2013.

BRASIL. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. **Diagnóstico temático serviços de Água e Esgoto - 2023**. Brasília, DF: SNIS, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf.

CHANG, Chia-Chi et al. A case study on the electricity generation using a micro gas turbine fuelled by biogas from a sewage treatment plant. *Energies*, v. 12, n. 12, p. 2424, 2019.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. *Reatores anaeróbios: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*, v.5. Belo Horizonte, MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG. 2aed., 2007. 380 p.

DEBOWSKI, Marcin; ZIELIŃSKI, Marcin. Wastewater treatment and biogas production: Innovative technologies, research and development directions. *Energies*, v. 15, n. 6, p. 2122, 2022.

Diamantis, Vasileios & Eftaxias, Alexandros & Stamatelatou, Katerina & Noutsopoulos, Constantinos & Vlachokostas, Christos & Aivasidis, Alexandros, 2021. **"Bioenergy in the era of circular economy: Anaerobic digestion technological solutions to produce biogas from lipid-rich wastes,"** *Renewable Energy*, Elsevier, vol. 168(C), pages 438-447.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2024 – Ano base 2023**. Ministério de Minas e Energia.

Brasília, DF: EPE, 2024. Disponível em:

https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_Síntese_2024_PT.pdf. Acesso em: ago. 2024.

ERGUVAN, Mustafa; MACPHEE, David; AMINI, Shahriar. Modelling of a novel near zero energy for a wastewater treatment plant with OXY-Biogas power cycle. *Energy Conversion and Management*, v. 267, p. 115926, 2022.

FERRER, Ivet et al. Optimising sewage sludge anaerobic digestion for resource recovery in wastewater treatment plants. *Renewable Energy*, v. 224, p. 120123, 2024.

FRANÇOIS, Mathurin et al. Advancement of nanotechnologies in biogas production and contaminant removal: A review. *Fuel*, v. 340, p. 127470, 2023.

GÓRKA, Justyna; CIMOCHOWICZ-RYBICKA, Małgorzata; POPROCH, Dominika. Sludge management at the Kraków-Płaszów WWTP—case study. *Sustainability*, v. 14, n. 13, p. 7982, 2022.

GUO, Guangze et al. Evaluation of bioenergy production and material flow in treating Japanese concentrated Johkasou sludge using high-solid anaerobic membrane bioreactor based on one-year operation. *Chemical Engineering Journal*, v. 469, p. 143918, 2023.

GUPTA, A. S., & Khatiwada, D. (2024). Investigating the sustainability of biogas recovery systems in wastewater treatment plants- A circular bioeconomy approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114447>

HENRIQUES, Alda A. et al. Leveraging logistics flows to improve the sludge management process of wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, v. 276, p. 122720, 2020.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Investimento para universalização do saneamento: o que ainda falta?** 2023. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/investimento-para-universalizacao-do-saneamento-o-que-ainda-falta/>. Acesso em: 23 out. 2024.

IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

INFRACON. Saneamento. Disponível em: https://www.infracon.com.br/infracon/?page_id=129. Acesso em: 03 jan. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. Acesso em: 23 out. 2024.

KADAM, Rahul et al. Realizable wastewater treatment process for carbon neutrality and energy sustainability: A review. *Journal of environmental management*, v. 328, p. 116927, 2023.

KHANAL, Samir Kumar et al. Anaerobic digestion beyond biogas. *Bioresource technology*, v. 337, p. 125378, 2021.

LASAKI, Behnam Askari et al. Sustainable transformation: Unlocking energy positivity in municipal wastewater treatment through innovative advanced primary treatment configurations for maximum solids separation. *Separation and Purification Technology*, v. 342, p. 127081, 2024.

LIU, Yongqiang; NILSEN, Paal Jahre; MAULIDIANY, Nopa Dwi. Thermal pretreatment to enhance biogas production of waste aerobic granular sludge with and without calcium phosphate precipitates. *Chemosphere*, v. 234, p. 725-732, 2019.

Lobato, Livia Cristina da Silva. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ENGD-8KYNF3>.

MAIA, Luisa Maria Horta. Cotratamento de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico em reatores UASB – estudo da viabilidade econômica do aproveitamento energético de biogás em Sergipe. 2020. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Cristóvão, 2020.

MARONI NETO, Ricardo. *Análise de investimentos econômicos e financeiros.* Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2022. 262 p. ISBN 9786556752341.

MCTI. Estimativas anuais de emissões de gases do efeito estufa no Brasil. Brasília/DF, 2022.

METOLINA, Patrícia; LOPES, Gabriela Cantarelli. Numerical analysis of liquid-solid flow in tapered and cylindrical fluidized beds for wastewater treatment and biogas production. *Energy Conversion and Management*, v. 187, p. 447-458, 2019.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **O que são as mudanças climáticas?** Brasília: ONU, 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-são-mudanças-climáticas>. Acesso em 15 Abr. 2024.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **População mundial chegará a 9,9 bilhões em 2054.** Brasília: ONU, 2024. Disponível em: <https://news.un.org/pt/content/terms-use>. Acesso em: 15 Abr. 2024.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **PNUD explica transição dos Objetivos do Milênio aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.** Rio de Janeiro: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/71657-pnud-explica-transicao-dos-objetivos-do-milenio-aos-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 16 Abr. 2024.

OLIVEIRA M.J., Carneiro C.D.R., Vecchia F.A.S., Baptista G.M.M. 2017. Ciclos climáticos e causas naturais das mudanças do clima. *Terræ Didática*, 13(3):149-184. <http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>

OLIVEIRA, Maurício Guimarães de et al. Microaerophilic treatment enhanced organic matter removal and methane production rates during swine wastewater treatment: A long-term engineering evaluation. *Renewable Energy*, v. 180, p. 691-699, 2021.

OTIENO, Job Oliver; CYDZIK-KWIATKOWSKA, Agnieszka; JACHIMOWICZ, Piotr. Enhancing Biogas Production Amidst Microplastic Contamination in Wastewater Treatment Systems: A Strategic Review. *Energies*, v. 17, n. 11, p. 2555, 2024.

PEREIRA, Brenda. *Análise da Produção de Biogás em uma Estação de Tratamento de Efluentes de São Leopoldo.* 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2022.

PFLUGER, Andrew et al. Anaerobic digestion and biogas beneficial use at municipal wastewater treatment facilities in Colorado: A case study examining barriers to widespread implementation. *Journal of Cleaner Production*, v. 206, p. 97-107, 2019.

PLUGGE, Caroline M. **Microbial Biotechnology.** John Wiley & Sons, Ltd.

Disponível em: <https://enviromicro-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/1751-7915.12854>. Acesso em: ago 2023.

RAMOS, Maria Angélica Barreto et al. Mudanças climáticas. Geodiversidade do Brasil, p. 163, 2008.

REY-MARTÍNEZ, Natalia et al. Comparing continuous and batch operation for high-rate treatment of urban wastewater. Biomass and Bioenergy, v. 149, p. 106077, 2021.

ROSA, André Pereira et al. **Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB:** estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). Engenharia Sanitária e Ambiental [online]. 2016, v. 21, n. 2 pp. 315-328. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/83533KcytbXmpwrmTsHzCYJ/>. Acesso em: 18 abr. 2024.

SAKIEWICZ, P. et al. Innovative artificial neural network approach for integrated biogas–wastewater treatment system modelling: Effect of plant operating parameters on process intensification. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 124, p. 109784, 2020.

SANAYE, Sepehr et al. Bio-gas augmentation and waste minimization by co-digestion process in anaerobic digestion system of a municipal waste water treatment plant. Energy Conversion and Management, v. 268, p. 115989, 2022.

SARPONG, Gideon; GUDE, Veera Ganeswar. Codigestion and combined heat and power systems energize wastewater treatment plants—analysis and case studies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 144, p. 110937, 2021.

SISTEMA FIEP. *Potencial de geração de energia com biogás no Brasil: experiências de uso e oportunidade de negócios*. Curitiba: Sistema Federação das Indústrias do Estado do Paraná, 2021. Disponível em: <https://www.sistemafiep.org.br/relacoes-internacionais/uploadAddress/Biogas%5B73656%5D.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2025.

SILVA, Letícia. Estações do Plano de Despoluição de Arroios de Caxias devem entrar em operação até o final do ano. GZH, 30 maio 2014. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2014/05/estacoes-do-plano-de-despoluicao-de-arroios-de-caxias-devem-entrar-em-operacao-ate-o-final-do-ano->

cj5vix8l40hqkxbj004ek64vl.html. Acesso em: 03 jan. 2025.

SILVA PEREIRA, Donisete et al. **Diversificação de fontes geradoras da matriz elétrica brasileira: uma revisão sistemática.** Meio Ambiente (Brasil), v. 3, n. 1, 2021. Disponível em: <https://meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/75/71>. Acesso em maio 2024.

SUN, Jiasi et al. Prediction of biogas production in anaerobic digestion of a full-scale wastewater treatment plant using ensembled machine learning models. *Water Environment Research*, v. 95, n. 6, p. e10893, 2023.

YANUKA-GOLUB, K. et al. An electrode-assisted anaerobic digestion process for the production of high-quality biogas. *Water Science and technology*, v. 79, n. 11, p. 2145-2155, 2019.

VON SPERLING, M. *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. v. 1. IWA Publishing. London, 2007.

WANG, Chuansheng et al. Enhanced dissolved methane recovery and energy-efficient fouling mitigation via membrane vibration in anaerobic membrane bioreactor. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 184, p. 106404, 2022.

ZAWIEJA, Iwona; WORWAŁ, Małgorzata. Biogas Production from excess sludge oxidized with peracetic acid (PAA). *Energies*, v. 14, n. 12, p. 3434, 2021.

ZILOTTI, H.A.R. (2012) Potencial de produção de biogás em uma Estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

ZIELIŃSKI, M., KAZIMIEROWICZ, J., & DEBOWSKI, M. (2023). Advantages and Limitations of Anaerobic Wastewater Treatment—Technological Basics, Development Directions, and Technological Innovations. In *Energies* (Vol. 16, Issue 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16010083>

ZIJING A., JUNJIE Z., MIN Z., YAN Z., XIAOMEI S., HONGJUN L., FAQIAN S., Anaerobic membrane bioreactor for the treatment of high-strength waste/wastewater: A critical review and update. *Chemical Engineering Journal*, v. 470, 2023,

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144322>.