

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MODELADEM DE REATOR ANAERÓBIO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO DE PORTO ALEGRE – RS COM FIM DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL
ENERGÉTICO

por

Alana Lourdes de Oliveira Sarquis

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, setembro de 2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Página obrigatória com a ficha catalográfica que consiste na descrição dos dados internacionais de catalogação na publicação, sendo sua elaboração de responsabilidade do aluno a partir da utilização do Catalográfica disponível na página do Sistema de Bibliotecas da UFRGS (SBUFRGS). A ficha catalográfica gerada pelo sistema deve ser copiada como imagem e colada no verso da folha de rosto.

Sarquis, Alana Lourdes de Oliveira
Modelagem de Reator Anaeróbio de Estação de
Tratamento de Esgoto em Porto Alegre - RS com fim de
avaliação do potencial energético / Alana Lourdes de
Oliveira Sarquis. -- 2023.
21 f.
Orientador: Darci Barnech Campani.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Modelagem de reator anaeróbio. 2. Avaliação de
potencial energético. 3. Energia renovável. I.
Campani, Darci Barnech, orient. II. Título.

Alana Lourdes de Oliveira Sarquis

MODELAGEM DE REATOR ANAERÓBIO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO DE PORTO ALEGRE – RS COM FIM DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL
ENERGÉTICO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignacio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Escolher uma das áreas de concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Darci Barnech Campani

Comissão de Avaliação:

Prof^a. Darci Barnech Campani (Presidente)

Prof. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Prof^a. Simone Ramires

Porto Alegre, setembro de 2023

DEDICATÓRIA

Gostaria de dedicar este estudo à professora Simone Ramires, por propor o tema abordado e ter estado tão presente ao fim da jornada da graduação.

Também gostaria de dedicar todo o esforço realizado na produção deste trabalho ao professor orientador Darci Barnech Campani, por todos os ensinamentos prestados e pelo envolvimento ao longo do estudo.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos professores que fizeram parte deste trabalho e de todos os processos envolvidos na criação dele, assim como aos colegas e amigos que estiveram comigo ao longo do desenvolvimento e por todo o apoio prestado.

Por fim, gostaria de agradecer também à loja La Cookiearacha e aos funcionários, pelo espaço e tempo cedido para a produção deste trabalho e por todo o apoio prestado nos percalços encontrados.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2023

MODELAGEM DE REATOR ANAERÓBIO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO DE PORTO ALEGRE – RS COM FIM DE
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO

Sarquis, Alana Lourdes de Oliveira
alana.los@gmail.com

Resumo. Os reatores anaeróbios são atualmente uma solução de baixo custo amplamente difundida no Brasil para o tratamento de resíduos orgânicos e esgoto doméstico. O sucesso da tecnologia atualmente tem se dado, principalmente, em razão do clima subtropical com temperaturas que costumam permanecer acima dos 20°C na maior parte do país. Como produto da degradação da matéria orgânica tem-se a produção de biogás, que atualmente é descartado a partir de queimas em “flares”, e lodo excedente, usualmente alocado em aterros sanitários. Ambos os descartes geram riscos ambientais e desperdício do potencial de geração de energia renovável atrelado ao metano presente no gás. O presente trabalho tem por objetivo a estimativa da produção de gases por parte do reator anaeróbio presente na ETE São João/Navegantes, em Porto Alegre-RS, a partir da metodologia proposta e posterior análise do potencial de geração energética dos componentes do biogás, propondo a reutilização destes produtos para outros fins e mitigando qualquer risco de danos ao meio ambiente.

Palavras-chave: reatores anaeróbios, biogás, lodo, metano, esgoto doméstico.

Modeling an anaerobic reactor at a sewage treatment station in Porto Alegre – RS in order to evaluate its energy potential

Abstract. Anaerobic reactors are currently a widely used low-cost solution in Brazil for treating organic waste and domestic sewage. The success of the technology today has been mainly due to the subtropical climate with temperatures that tend to remain above 20°C in most of the country. The product of the degradation of organic matter is the production of biogas, which is currently discarded by burn in flares, and surplus sludge, which is usually disposed of in landfills. Both waste streams generate environmental risks and waste the potential for generating renewable energy linked to the methane present in the gas. The aim of this study is to estimate the production of gases by the anaerobic reactor at the São João/Navegantes Sewage Treatment Station in Porto Alegre-RS, using the methodology proposed and then analyze the potential for energy generation from the biogas components, proposing the reuse of these products for other purposes and mitigating any risk of damage to the environment.

Keywords: anaerobic reactors, biogas, sludge, methane, domestic sewage.

NOMENCLATURA

Símbolos

A	Número de átomos de Hidrogênio na molécula	
B	Número de átomos de Oxigênio na molécula	
C	Concentração	[%]
D	Número de átomos de Nitrogênio na molécula	
DQO	Demanda química de Oxigênio	[kg d ⁻¹]
DQO_{acid}	Demanda química de oxigênio consumida na acidogênese	[kg d ⁻¹]
DQO_{CH_4}	Fração da demanda química de Oxigênio convertida em metano	[kg d ⁻¹]
DQO_{H_2S}	Fração da demanda química de oxigênio convertida em ácido sulfídrico	[kg d ⁻¹]
DQO_{met}	Demanda química de oxigênio consumida na metanogênese	[kg d ⁻¹]
DQOr	Demanda química de oxigênio removida	[kg d ⁻¹]
DQO_{TOTAL}	Demanda química de oxigênio total	[kg d ⁻¹]
E	Mols de produto produzidos por mol de componente	[mol/mol]
f(t)	Fator que considera a influência da temperatura	[kg m ⁻¹]
K_{DQO}	Demanda química de oxigênio de referência	[kg d ⁻¹]
M_{prod}	Massa molar do produto	[g mol ⁻¹]
Md	Massa diária	[kg d ⁻¹]
MO	Massa diária de matéria orgânica	[kg d ⁻¹]
Mp	Massa diária de produto	[kg d ⁻¹]
M_{comp}	Massa molar do componente	[g mol ⁻¹]
M_S	Massa molar do íon sulfato	[g mol ⁻¹]
M	Quantidade molar de gás oxigênio para oxidar uma molécula	[mol]

N	Número de átomos de Carbono na molécula	
\dot{n}	Quantidade molar por dia	[mol d ⁻¹]
P	Pressão	[Pa]
<i>PCI</i>	Poder calorífico inferior	[kJ kg ⁻¹]
<i>PCI_{CH4}</i>	Poder calorífico inferior do metano	[kJ kg ⁻¹]
Q	Vazão	[m ³ d ⁻¹]
<i>Q_{BIOGÁS}</i>	Vazão de biogás	[m ³ d ⁻¹]
<i>Q_{CH4}</i>	Vazão de metano	[m ³ d ⁻¹]
R	Constante universal dos gases	[m ³ Pa mol ⁻¹ K ⁻¹]
S	Quantidade molar do íon sulfato	[mol]
T	Temperatura	[°C]
<i>Y_{acid}</i>	Taxa de produção celular referente ao processo de acidogênese	
<i>Y_{met}</i>	Taxa de produção celular referente ao processo de metanogênese	

Símbolos gregos

ε	Eficiência do reator
---------------	----------------------

Abreviaturas e acrômimos

DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto
ETE	Etação de tratamento de esgoto
pH	Potencial de hidrogênio
RS	Rio Grande do Sul
SEEG	Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa

1. INTRODUÇÃO

Os digestores anaeróbios são uma solução de baixo custo e acessível para o tratamento e digestão de compostos orgânicos, conforme constatado por Chernicharo (2019). Essa tecnologia tem sido muito aplicada para o tratamento de rejeitos de culturas agrícolas, dejetos de animais, lodo das Estações de Tratamento de Esgoto e resíduos sólidos urbanos, tendo um resultado ainda mais positivo em países de clima tropical, que é o caso de uma porção considerável do Brasil. A importância do clima tropical se dá devido à baixa atividade dos microrganismos anaeróbios a temperaturas menores que 20°C e ao aumento considerável dos custos de aquecimento dos reatores anaeróbios presentes na maior parte das Estações de Tratamento de Esgoto.

A tecnologia anaeróbia conta com inúmeras vantagens, sendo as principais delas o baixo consumo de energia e os baixos custos de implantação, também possuindo considerável tolerância a elevadas cargas orgânicas. No entanto, conforme descrito por Chernicharo (2019), dentre as desvantagens estão a remoção insatisfatória de fósforo, nitrogênio e patógenos e a produção de substâncias corrosivas e/ou extremamente nocivas ao meio ambiente, como o dióxido de carbono, gás metano e ácido sulfídrico, que apresentam um grave problema para as Estações de Tratamento de Esgoto atualmente, pela escassez de destinos adequados para os gases oriundos da digestão anaeróbia.

O biogás resultante do processo de digestão anaeróbia nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) pode ser aproveitado para fins energéticos, assim como o lodo excedente dos processos de digestão anaeróbia, apesar do potencial prejudicial ao meio ambiente, sendo 28 vezes mais danoso que o dióxido de carbono à camada de ozônio (SEEG, 2019). Atualmente as ETEs têm por hábito o descarte do lodo excedente em aterros sanitários e a queima do biogás em *flares*, tendo todo seu potencial energético desperdiçado e, ainda, gerando danos consideráveis ao meio ambiente, como explicado por Koga *et al.* (2015).

Este trabalho tem por objetivo o estudo e a modelagem matemática de um reator anaeróbio, usando como exemplo o reator presente na ETE São João/Navegantes, localizada na cidade de Porto Alegre – RS, a fim de estimar a produção de metano proveniente da digestão anaeróbia dos efluentes e, através da análise dos parâmetros atuais de trabalho do reator, dimensionar a produção de biogás, o que possibilitaria a futura avaliação do potencial energético do gás produzido conjuntamente ao lodo e sugestões de destinos mais adequados e aproveitáveis aos produtos da digestão anaeróbia.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A digestão anaeróbia é uma etapa do tratamento de efluentes, também estando presente na Estação de Tratamento de Esgoto de São João/Navegantes localizada na cidade de Porto Alegre – RS. O processo anaeróbio é capaz de degradar todos os compostos orgânicos. Segundo Chernicharo (2019), nos sistemas anaeróbios, a maior parcela (50 a 70%) do esgoto efluente é convertida em gás metano, enquanto 5 a 15% é convertida em biomassa microbiana em fase sólida (lodo excedente) e uma parcela de 10 a 30% sai do reator como material não degradado (efluente líquido). O presente trabalho terá maior foco no potencial energético proveniente do gás metano, constituinte do biogás e do lodo excedente que, apesar de sólido, é composto por cerca de 90% de água.

2.1. Reator Anaeróbio e processos de degradação da matéria orgânica

O processo de degradação da matéria orgânica ocorre a partir de processos naturais de fermentação e respiração anaeróbia microbiana. A degradabilidade do afluente pode ser

expressa através da Demanda Química de Oxigênio (DQO), sendo esse parâmetro dado pela quantidade de oxigênio (O_2) necessária para a completa oxidação da matéria orgânica que adentra o reator e que deve ser obtido experimentalmente através de estudo aplicado ao material. A remoção de DQO do sistema está diretamente atrelada à eficiência da degradação da matéria orgânica, como demonstrado por dos Santos. *et al.* (2012).

“O processo da digestão anaeróbia pode ser dividido em quatro fases, sendo: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Cada etapa é realizada por diferentes grupos de microrganismos, em simbiose, e podem requerer diferentes condições ambientais.” (KUNZ *et al.*; 2019) É necessário entender cada uma das etapas a fim de entender de que forma ocorre a produção do biogás e o comportamento do lodo excedente nos digestores anaeróbios, sendo o biogás um composto de dióxido de carbono (CO_2), gás metano (CH_4) e outros gases, como hidrogênio e nitrogênio, que, por estarem presentes em quantidades ínfimas, são tratadas como impurezas. As quatro etapas, cujo funcionamento está descrito na figura 1, ainda segundo Kunz *et al.* (2019), consistem em:

Hidrólise: Nesta etapa, são degradadas as moléculas orgânicas mais complexas, como lipídios, polissacarídeos e proteínas, a importância desta etapa para o processo se dá somente na presença de dejetos de difícil digestão, sendo, na presença destes, a reação limitante da velocidade da digestão.

Acidogênese: Na sequência, as bactérias fermentativas metabolizam açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, gerando através do processo fermentativo os ácidos orgânicos, que serão consumidos na etapa seguinte.

Acetogênese: Esta etapa, apesar de necessária, pode se tornar problemática, já que a oxidação dos compostos orgânicos intermediários libera grandes quantidades de hidrogênio (H_2), o que faz com que o pH do meio decresça consideravelmente, tornando o ambiente impróprio para a atividade bacteriana. Desta forma, é necessário que haja um equilíbrio entre a acetogênese e a metanogênese, de modo que o acetato e o hidrogênio sejam consumidos pelos microrganismos metanogênicos.

Metanogênese: Esta é a última etapa do processo, na qual as arqueas metanogênicas transformam o carbono presente nos compostos orgânicos em dióxido de carbono e metano, sendo esse o processo responsável pela geração de biogás na digestão anaeróbia.

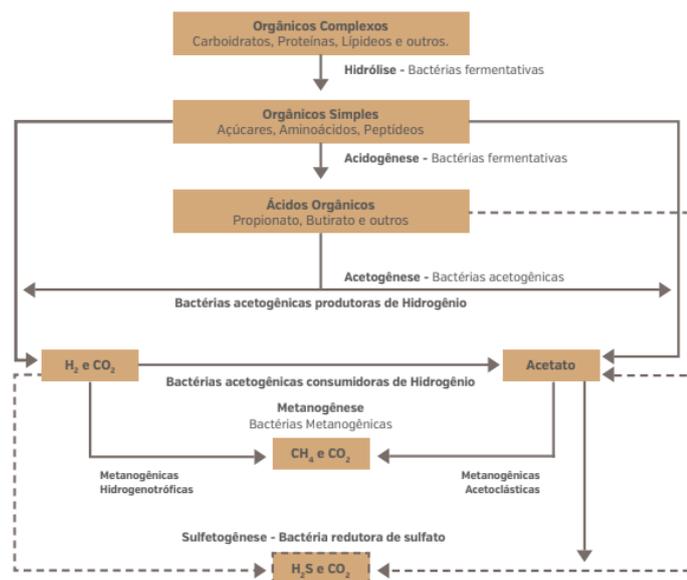


Figura 1: Sequenciamento dos processos que compõem a digestão anaeróbia. Fonte: Chernicharo (2007).

Porém, como explicado por Chernicharo (2019), há outro processo que ocorre em paralelo à metanogênese nos reatores, a possível presença de sulfato no meio anaeróbico define a ocorrência da sulfetogênese, o que gera uma competição por substrato entre as bactérias sulforedutoras e as arqueas metanogênicas. O ácido sulfídrico resultante da sulfetogênese é responsável por problemas de corrosão, mau cheiro e até toxicidade nos reatores anaeróbios, sendo também extremamente prejudicial à formação de biogás.

2.2. Lodo excedente

O efluente da ETE São João/Navegantes é bombeado por um caminho complexo até, em muitos casos, alcançar um reator anaeróbico. Ao adentrar a ETE, a matéria orgânica parcialmente dissolvida em água ou em estado parcialmente sólido é conduzido por uma bomba elevatória que leva o composto para tanques de aeração, onde tem início o processo de separação dos resíduos maiores e a digestão da matéria orgânica, após ser mantido inerte em um ambiente pouco propício para o pleno desenvolvimento de bactérias, o efluente líquido é direcionado ao reator anaeróbico, onde o ambiente propicia a formação e o desenvolvimento das arqueas e bactérias, responsáveis pela degradação de grande parte da matéria orgânica a taxas diretamente dependentes da eficiência do reator.

Durante o processo de digestão da matéria orgânica no interior do reator anaeróbico, responsável por elevar a qualidade do efluente a níveis legalmente aceitos para posterior descarte, ocorre a formação do lodo excedente, que é usualmente recolhido e destinado ao aterro sanitário, conforme explicado por Martins *et al.* (2018).

O lodo excedente das estações de tratamento de esgoto costuma ser formado majoritariamente por água (cerca de 90% ao sair do reator, segundo dados coletados por Cavalcanti (2019), resíduos de matéria orgânica não digerida no reator e produtos dos processos da digestão anaeróbia. No caso abordado neste estudo, o lodo é direcionado a uma centrífuga, que reduz aproximadamente 5% da água, no entanto não há outros processos de secagem.

2.3. Biogás

A origem do biogás se dá por meio da digestão anaeróbia da matéria orgânica, sendo composto majoritariamente por metano, dióxido de carbono e outros gases em menores proporções, geralmente considerados como impurezas. Dos componentes formadores do biogás, apenas o metano possui valor econômico e possível potencial energético, segundo Cavalcanti (2019).

Dentre as “impurezas”, pode ocorrer a formação de ácido sulfídrico quando há a presença de sulfato na matéria orgânica a ser degradada. O ácido sulfídrico, no entanto, pode ser causador de problemas no reator, como toxicidade e corrosão e, em casos extremos, inviabilizar o uso do biogás. Em razão de fatores como a presença de gases secundários que prejudicam a eficiência do biogás como forma de geração de energia limpa e renovável, há diversos métodos conhecidos para purificação do produto final, com o objetivo de elevar o teor de metano em sua composição. Contudo, o presente estudo trabalhará com o biogás em sua forma originária, tendo como principal objetivo avaliar o potencial energético do produto dos processos de digestão da matéria orgânica em reatores anaeróbios.

3. METODOLOGIA

Para compreensão inicial do ciclo de trabalho do lodo e do biogás originários da digestão anaeróbia, foi realizada uma visita técnica a uma das estações de tratamento de esgoto, onde foi possível constatar oportunidades de aprimoramento do potencial energético, não só do biogás,

mas de ambos os produtos do tratamento do esgoto coletado em Porto Alegre - RS. Por conseguinte, em reunião com o engenheiro responsável do DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgoto), foi selecionado o reator anaeróbio da ETE São João/Navegantes como objeto de estudo.

Os principais parâmetros de acompanhamento da produção de gases em um reator anaeróbio são a temperatura (que idealmente seria constante e superior aos 20°C, no entanto comumente consiste na temperatura ambiente, dada a inviabilidade de manutenção e controle da temperatura na maior parte dos reatores anaeróbios), a pressão a que o gás estaria submetido (geralmente, e neste caso, dada pela pressão atmosférica), a vazão de trabalho do fluxo do efluente e a composição da matéria orgânica que adentra o reator, aqui obtida através de pesquisas bibliográficas, dada a impossibilidade de realização dos testes necessários.

Em nova visita realizada, desta vez, na ETE São João/Navegantes para estudo mais aprofundado do reator, verificou-se a produção de cerca de 3,5 toneladas de lodo por dia (no presente estudo o dia consistirá nas oito horas de funcionamento diário do sistema anaeróbio, considerando o caso mais positivo apesar do funcionamento intermitente). Segundo a coordenação da ETE, o lodo, após o processo de centrifugação, passa a ser constituído por 85% de água e 15% de matéria orgânica (não necessariamente biodegradável) e gera uma produção diária de 5 m³ de resíduos. Através da equação 1 e presumindo que a vazão de entrada e saída do fluido no reator seja constante e igual a 5 m³/dia, será possível a obtenção aproximada da massa de cada componente presente na matéria orgânica a ser degradada.

$$Md = c \times MO \quad (1)$$

Na equação 1, Md e MO são dadas em kg/dia e c consiste na concentração do componente do lodo em porcentagem (%) de massa. Inicialmente identificou-se uma possível composição para o lodo do esgoto doméstico, que segundo Carvalho *et al* (2015), pode ser representado em diversas situações pela tabela 1 abaixo, onde LAC é proveniente de digestão anaeróbia, condicionado com cal hidratada e cloreto férrico e desidratado mecanicamente, LAP é proveniente de digestão anaeróbia condicionado com polímero sintético e desidratado mecanicamente, LAS é também proveniente de digestão anaeróbia, condicionado com polímero sintético, mas desidratado com secagem térmica, CL proveniente de tratamento aeróbio em lagoas de decantação, condicionado com polímero sintético e passou por processo de compostagem, já o LLP, lodo selecionado para o estudo, é proveniente de tratamento aeróbio em lagoas de decantação, condicionado em polímero sintético e secado em leitos com revolvimento periódico.

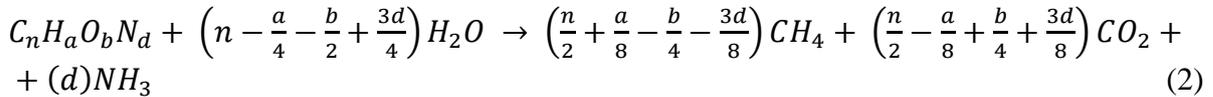
Tabela 1: Composição das amostragens de lodo. Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.* (2015)

Lodo	Açúcares	PB	Lipídeos	Celulose	Lignina	Fenóis	Taninos
	(%)						
LAC	0,05	42,6	7,5	37,2	4,1	0,03	0,01
LAP	0,02	41,6	8,0	22,3	30,2	0,03	0,02
LAS	0,05	42,2	13,2	21,9	21,3	0,04	0,02
LLP	0,04	27,7	4,2	33,2	30,6	0,07	0,04
CL	0,03	25,4	2,6	43,0	22,0	0,07	0,04

3.1. Estimativa da produção bruta de dióxido de carbono resultante da digestão anaeróbia

A metodologia proposta por Chernicharo (2019), por meio da equação estequiométrica de Buswell (equação 2 demonstrada a seguir) permite calcular a quantidade bruta de gás metano (CH₄) produzida por meio dos processos decorrentes da degradação do lodo proveniente do

esgoto sanitário doméstico, através de um balanço estequiométrico da composição da matéria orgânica a ser degradada no reator e dos produtos do processo (CHERNICHARO, 2019). Em conjunto, torna-se possível estimar também a quantidade de dióxido de carbono (CO_2) resultante no sistema.



Os coeficientes caracterizam a composição de cada componente da matéria orgânica a ser degradada no reator, sendo possível obter a quantidade formada de cada produto na degradação de cada um dos componentes orgânicos. Através da equação 3, é possível relacionar a massa de cada componente a ser degradada por dia (Md) à massa diária de produto gerado (Mp):

$$Mp = \frac{Md \times M_{prod} \times E}{M_{comp}} \quad (3)$$

Onde E representa o número de mols de produto a partir de 1 mol do componente, Mprod é correspondente à massa molar do produto (em kg/mol) e Mcomp à massa molar do componente do lodo (em kg/mol). Então, a vazão molar diária (em mol/dia) de um dado produto, a partir de um componente do lodo, é dada por:

$$\dot{n} = \frac{Mp}{M_{prod}} \quad (4)$$

3.1.1 Vazão dos gases resultantes

Para que seja possível encontrar a vazão de cada componente do gás, é admitido o comportamento do gás ideal, segundo Moran *et al.* (2013). Mantendo o princípio dos gases ideais, a Vazão (Q) em m³/dia pode ser expressa através da equação 5 disposta abaixo:

$$Q = \frac{\dot{n} \times R \times (273 + T)}{P} \quad (5)$$

Na equação 5, \dot{n} representa o número de mols produzido por dia, R representa a constante universal dos gases (equivalente a 8,314 kJ/mol.K), T é a temperatura de trabalho do reator em °C (22°C segundo avaliação realizada pela Sulgás em 2017) e P é a pressão de trabalho do gás aqui usada em Pa (atmosférica).

3.2. Estimativa da produção líquida de metano através do DQO removido do sistema

Como citado pelo PROBIOGAS (2015), DQO consiste no oxigênio equivalente necessário para oxidar a matéria orgânica quimicamente, portanto, é possível utilizar o balanço estequiométrico presente na equação 6 (reação de oxidação do composto presente no efluente) para obter a proporção necessária de O₂ para cada molécula do composto orgânico a ser avaliada.

Para estimar a quantidade líquida de metano produzido, faz-se necessário considerar a parcela de substrato que é consumida para produção celular das bactérias responsáveis pelos processos. Para este fim, é necessário calcular a DQO de cada componente orgânico a ser degradado.



Com a quantidade em mols (m) de O_2 necessária, pode-se calcular a DQO da parcela do substrato avaliada, sendo a DQO do componente expressa por:

$$DQO = \frac{m \times Mo \times Md}{M_{comp}} \quad (7)$$

Na equação 7, Mo correspondente à massa molar do O_2 (em kg/mol), Md, já descrita anteriormente, em kg/dia e Mcomp também em kg/mol. Por conseguinte, a DQO total do substrato pode ser expressa pelo somatório das DQO dos componentes presentes nele.

$$DQO_{TOTAL} = \sum_i DQO_i \quad (8)$$

Já a DQO removida do sistema será aqui chamada como DQOr e expressa a quantidade de matéria orgânica que não estava mais presente no efluente líquido ao deixar o reator, estando diretamente relacionada à eficiência do reator anaeróbico, que, segundo o resultado obtido em experimentações realizadas a partir de um reator anaeróbico também em funcionamento intermitente por dos Santos *et al.* (2012), varia entre 44% e 76% e, portanto, fará necessário a realização do cálculo para cada uma das eficiências (ε) propostas. A DQO removida do sistema é dada pela equação 9.

$$DQOr = DQO_{TOTAL} \times \varepsilon \quad (9)$$

No entanto, ainda segundo a metodologia proposta por Chernichado (2019), parte da DQOr acaba sendo usado para produção celular, impedindo que o DQOr seja totalmente convertido em metano, conforme a equação 10.

$$DQOr = DQO_{CH_4} + DQO_{acid} + DQO_{met} \quad (10)$$

Na equação 10, DQOacid e DQOmet são a demanda química de oxigênio correspondente aos processos de acidogênese e metanogênes, respectivamente, dadas por:

$$DQO_{acid} = Y_{acid} \times DQOr \quad (11)$$

$$DQO_{met} = Y_{met} \times (DQOr - DQO_{acid}) \quad (12)$$

Nas equações 11 e 12, a DQO acid é referente à acidogênese, cujo processo antecede a metanogênese e, portanto, deve ser subtraída diretamente da DQO removida, diferentemente da DQOmet, que deve ser calculada com relação ao resultado da subtração, como demonstrado anteriormente. Y_{acid} é a taxa de produção celular ligada ao processo de acidogênes, cuja grandeza é variável com o substrato, assim como o Y_{met} , que se trata da taxa de crescimento celular ligada às arqueas metanogênicas, que após ocorrência da acidogênese, passa a ser acidificado, possuindo valores que conforme demonstrado por Chernicharo (2019), podem ser variáveis, o presente trabalho considerará o caso de maior crescimento celular e utilizará a maior taxa proposta, que consiste em 0,17 para o Y_{acid} e 0,05 para o Y_{met} .

Obtém-se a vazão (Q) de metano diária, a partir da DQO_{CH_4} , conforme:

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{f(T)} \quad (13)$$

Na equação 13, $f(T)$ o fator que considera a influência da temperatura para um gás com temperatura superior a 0°C (273 K). Segundo Chernicharo (2019), $f(T)$ é dado por:

$$f(T) = \frac{P \times K_{DQO}}{R \times (273+T)} \quad (14)$$

Na equação 14, P representa a pressão em kPa, T a temperatura de trabalho do gás em graus celsius, R a constante universal dos gases, equivalente a 8,314 kJ/mol.K e, por fim, K_{DQO} corresponde a DQO referência para o metano (CH_4), dada em kg/mol.

3.1.2 Cálculo da redução do sulfato

Como explicado anteriormente, a presença de enxofre na matéria orgânica a ser degradada pelo reator anaeróbio pode prejudicar a formação de metano, já que as bactérias sulforedutoras acabam por competir substrato com as arqueas metanogênicas. Sendo, portanto, necessário calcular a quantidade de ácido sulfídrico remanescente no reator, caso ocorra a formação desse produto.

A reação de oxidação do composto presente na matéria orgânica do lodo prevê a formação de íons sulfato nos processos intermediários do reator e a presença desses íons no substrato, gera a formação de ácido sulfídrico que é liberada conjuntamente com o gás metano e compõe o biogás resultante. Segundo Chernicharo (2019), a relação que governa o processo de oxidação do sulfato apresenta um comportamento constante de proporção de 1,5 gSO_4^{2-} para 1 $gDQO_{H_2S}$. Através dessa relação, é possível estimar que a DQO “perdida” na formação do ácido sulfídrico:

$$DQO_{H_2S} = \frac{s \times Ms}{1,5} \quad (15)$$

Na equação 15, s é a quantidade disponível de enxofre (em mols), Ms é a massa molar do íon sulfato (em g) e DQO_{H_2S} (aqui dada em g/dia) será a DQO subtraída da DQO_{CH_4} para a formação de ácido sulfídrico. Com a DQO_{H_2S} convertida em kg/dia, torna-se possível calcular a vazão de ácido sulfídrico, dada por Q_{H_2S} .

$$Q_{H_2S} = \frac{DQO_{H_2S}}{f(T)} \quad (16)$$

Neste caso, K_{DQO} passa a representar a DQO necessária para oxidar 1 mol de íons sulfato, que coincidentemente é dado também por 0,064 kg/mol, assim como no caso do metano.

3.3. Análise do potencial energético através do poder calorífico

Para análise do potencial energético presente no biogás produzido na ETE São João/Navegantes será realizada através de uma análise quantitativa do poder calorífico resultante do gás formado pela produção conjunta de dióxido de carbono e gás metano. O biogás é composto majoritariamente pelos gases metano e carbônico, entretanto, com a presença do enxofre nos compostos presentes na matéria orgânica, faz-se necessário considerar a quantidade de ácido sulfídrico (H_2S) produzida. Portanto, o biogás resultante do presente estudo terá sua vazão diária ($Q_{BIOGÁS}$) dada por:

$$Q_{BIOGÁS} = Q_{CO_2} + Q_{CH_4} + Q_{H_2S} \quad (17)$$

Contudo, como somente o metano tem potencial de geração de energia, o poder calorífico do gás resultante será dado por:

$$PCI = \left(PCI_{CH_4} \times \frac{Q_{CH_4}}{Q_{BIOGÁS}} \right) \quad (18)$$

Na equação 18, PCI consiste no poder calorífico inferior do biogás, dado em kJ/m³.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

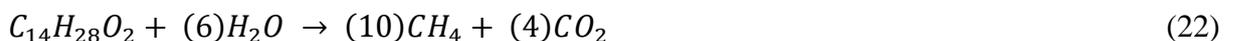
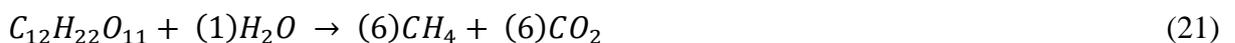
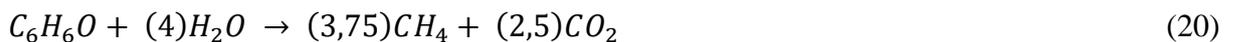
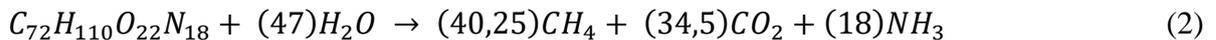
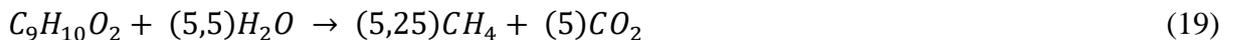
O presente trabalho representará os açúcares como a Sacarose, os lipídeos como um ácido graxo com uma cadeia carbônica de 14 elementos (LIU *et al*, 2017), a hemicelulose pela mesma molécula formadora da celulose e a Proteína Bruta (PB) pela Albumina, que como informado por Carrascal *et al* (2023), é a proteína mais comumente encontrada no esgoto doméstico. Portanto, a disposição final dos componentes do lodo do esgoto doméstico será a demonstrada na tabela 2 a seguir.

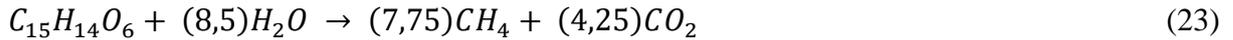
Tabela 2 – Composição do lodo utilizada para o estudo

Composto	Fórmula molecular	Presença (%)	Massa diária (kg/dia)
Lignina	$C_9H_{10}O_2$	30,6	160,65
Albumina	$C_{72}H_{110}O_{22}N_{18}S_{10}$	27,7	145,43
Fenol	C_6H_6O	0,07	0,37
Sacarose	$C_{12}H_{22}O_{11}$	0,04	0,21
Lipídeo	$C_{14}H_{28}O_2$	4,2	22,05
Tanino	$C_{15}H_{14}O_6$	0,04	0,21
Celulose	$C_6H_{10}O_5$	33,2	174,30

Ainda na tabela 2, foram apresentados os valores obtidos de massa diária com relação a cada elemento presente na matéria orgânica. O cálculo foi realizado a partir de 15% de toda a massa de lodo gerada por dia, já que 85% trata-se de água.

A partir da equação estequiométrica de Buswell, aplicada a cada um dos compostos identificados anteriormente, foi possível obter os seguintes balanços estequiométricos:



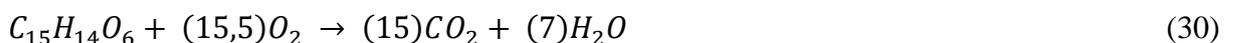
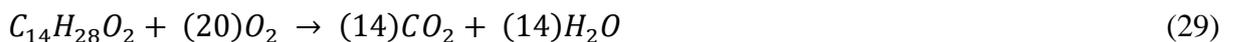
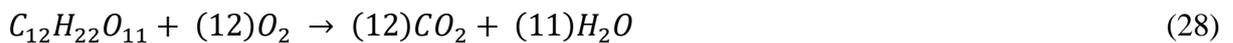
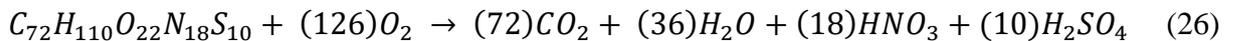


Por conseguinte, foi possível obter a massa diária de CO_2 produzida a partir dos balanços anteriores, tendo os outros parâmetros sido inicialmente desconsiderados, pois a produção estimada de metano a partir da equação de Buswell não corresponde à quantidade real de metano a ser produzido diariamente, já que, ao não considerar a parcela do substrato destinada à reprodução celular, superestima a quantidade de metano produzida. Na tabela 3 a seguir estão representados o potencial de geração de dióxido de carbono de cada item em quilogramas por dia e em número de mols por dia.

Tabela 3 – Taxas diárias de geração de dióxido de carbono

Componente gerador	Kg/dia	Mol/dia	m³/dia
Lignina	232,62	5286,82	127,95
Albumina	116,19	2640,68	63,92
Fenol	0,43	9,77	0,24
Sacarose	0,16	3,64	0,09
Lipídeo	17,02	386,82	9,36
Tanino	0,14	3,18	0,08
Celulose	142,02	3227,73	78,13
TOTAL	508,58	11558,64	279,78

Em conjunto com a massa diária de dióxido de carbono, a Tabela 3 também apresenta as taxas diárias parciais e total de produção do dióxido de carbono em m³/dia. A seguir, para ser possível estimar a produção líquida diária de gás metano, foram desenvolvidas as reações estequiométricas de oxidação de cada item, como observado nas equações abaixo:



Em seguida, com o número de mols de oxigênio necessários em cada reação, foi possível obter a DQO parcial de cada parcela do lodo e a DQO total que adentra o reator, por meio da metodologia explicada anteriormente.

Tabela 3 – DQO parcial de diferentes componentes do lodo

Composto	DQO (kg/dia)
Lignina	394,13
Albumina	308,62
Fenol	0,88
Sacarose	0,24
Lipídeo	61,9
Tanino	0,36
Celulose	206,58
TOTAL	972,71

Para o cálculo da DQO removida do reator anaeróbio serão utilizados dois níveis de eficiência, que segundo dos Santos *et al.* (2012), para um reator com funcionamento intermitente, pode variar de 44% a 76%, então aqui serão calculadas as DQOs parciais do sistema levando em consideração ambos os valores possíveis. Conforme referido anteriormente, de acordo com os dados propostos por Chernicharo (2019), os coeficientes de produção de biomassa (Y) variam entre 0,14 e 0,17 para um substrato composto por carboidratos, portanto (supondo o pior caso) será usado 0,17 como Y_{acid} . Já para o Y_{met} usaremos o coeficiente de 0,05, ainda segundo Chernicharo (2019), que corresponde ao maior crescimento celular em um substrato formado majoritariamente por ácidos de cadeias curtas, que é o meio no qual a metanogênese ocorre.

Tabela 4 – Remoção de DQO e DQOs parciais do sistema proposto

Eficiência (%)	DQOr (kg/dia)	DQO_{acid} (kg/dia)	DQO_{met} (kg/dia)	DQO_{H_2S} (kg/dia)	DQO_{CH_4} (kg/dia)
44	258,91	44,02	10,75	0,64	203,51
76	447,21	76,03	18,56	0,64	351,99

Através do método proposto por Chernicharo, 2019, é possível obter a vazão diária de metano gerada no reator a partir das DQOs calculadas. A figura 2 apresentada a seguir traz um gráfico representativo do volume de gás metano emitido por dia por cada componente presente na composição estudada de esgoto doméstico.

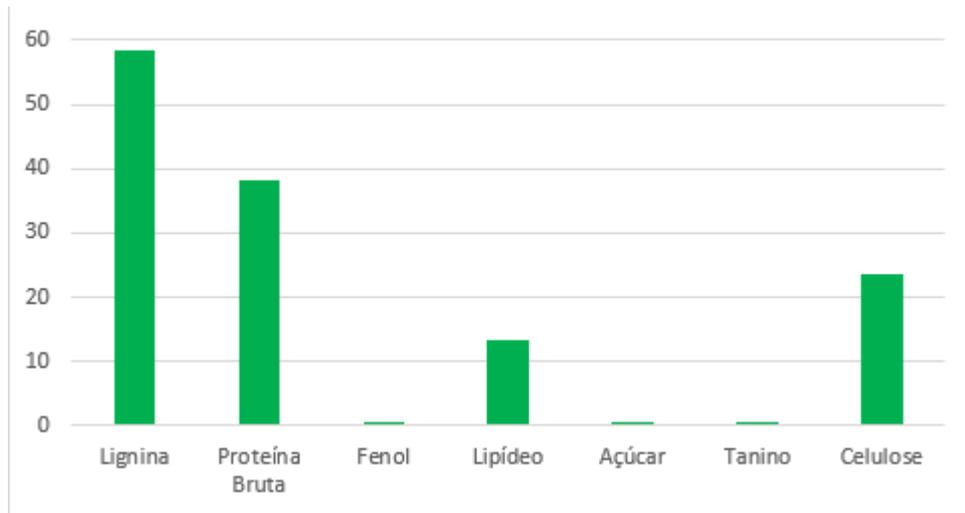


Figura 2 - Volume diário de metano (em m³/dia) proveniente de diferentes componentes do lodo.

A figura 3 apresenta o volume de dióxido de carbono gerado diariamente pela mesma composição estudada.

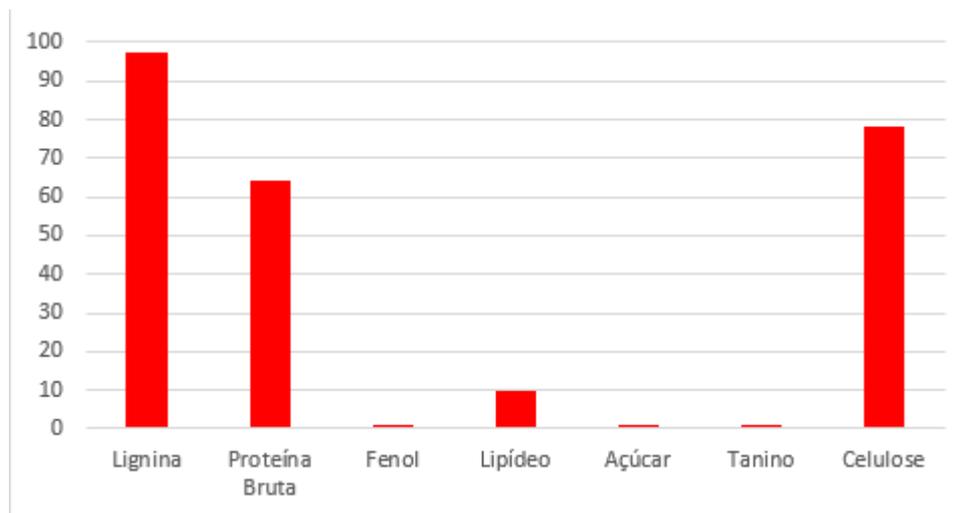


Figura 3 - Volume diário de dióxido de carbono (em m³/dia) proveniente de diferentes componentes do lodo.

Por conseguinte, torna-se possível a realização de um comparativo entre os valores obtidos de produção diária de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), presente na figura 4 abaixo, onde observa-se resultados contrários aos encontrados por da Silva (2015) para a composição do biogás gerado pela digestão anaeróbia do esgoto doméstico. No entanto, também é possível observar que a degradação do lipídeo gera uma proporção mais próxima da esperada, sendo equivalente a aproximadamente 60% de gás metano e 40% de dióxido de carbono.

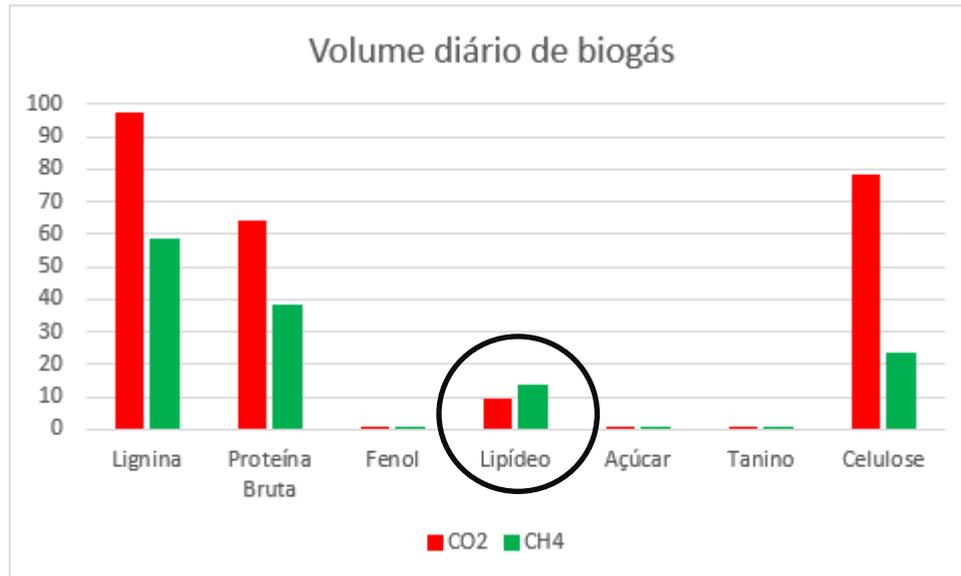


Figura 4 - Volume diário de dióxido de carbono e metano (em m³/dia) proveniente de diferentes componentes do lodo, com destaque para as proporções de produção de metano e dióxido de carbono pelos lipídeos.

Ao considerar o volume total calculado de biogás (382,36 m³/dia), tornou-se possível estabelecer um comparativo entre composições, através do qual foi realizado o estudo do potencial energético de cada amostragem por meio do cálculo do poder calorífico dos gases. A tabela 5 a seguir exemplifica este comparativo:

Tabela 5 – Comparativo de composição de biogás e poder calorífico

	Volume CO ₂ (m ³)	%	Volume CH ₄ (m ³)	%	PCI (kJ/m ³)
Presente trabalho	249,09	65	133,27	35	12561,43
da Silva, A. L., 2015	152,94	40	229,42	60	21533,88
DMAE, 2023	114,71	30	249,09	65	23328,31

Como pode ser observado, o biogás tem um poder calorífico naturalmente elevado, podendo ser comparado ao do Etanol, nos casos de composições de 60% ou mais de metano. No entanto a estimativa encontrada através da metodologia de Chernicharo (2019) não corresponde aos dados conhecidos, o que, apesar de não invalidar o uso da metodologia, mostra que a composição do esgoto doméstico utilizada não corresponde à realidade da ETE São João/Navegantes em Porto Alegre - RS, que conforme análise realizada em 2017 pela Sulgás, obtém proporções bem superiores de metano com relação às encontradas no presente trabalho. Em conjunto com o poder calorífico elevado do biogás, também contamos com o lodo residual da ETE que, segundo Moura *et al.* (2017), quando em frações sólidas voláteis, pode possuir um poder calorífico semelhante ao da lenha.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada a estimativa da produção de gases no interior do reator anaeróbio presente na ETE São João/Navegantes, por meio da modelagem proposta por Chernicharo (2019), que permite estimar valores teóricos de produção de dióxido de carbono, gás metano e de ácido sulfídrico. Contudo, os valores obtidos não refletiram a realidade da composição, já bastante difundida e até mesmo testada em laboratório. O que gerou a necessidade de análise dos resultados parciais para cada composto estudado, permitindo a constatação que a

composição proposta por Carvalho *et al.* (2015) pode apresentar divergências com relação ao efluente da ETE São João/Navegantes da cidade de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul.

Como descrito por Carvalho *et al.* (2015), o lodo estudado possuía elevadas concentrações de lignina e celulose, que podem ter afetado o resultado, o que não invalida, mas com certeza reduz a qualidade do material como potencial fonte de energia limpa e renovável. Outro fator determinante nos resultados obtidos acabou sendo a impossibilidade de representação adequada das moléculas formadoras da matéria orgânica, apesar de selecionadas com base na maior proximidade possível da realidade do esgoto doméstico, a representação das diversas possibilidades de proteínas como apenas uma molécula de albumina ou da estrutura inumerável da celulose por meio de uma molécula ‘formadora’, acabaram reduzindo as probabilidades de reprodução fiel do lodo.

No entanto o modelo proposto mostrou-se eficiente para a estrutura avaliada de lipídeo, aqui representado como um ácido graxo com uma cadeia carbônica de 14 elementos, e resultou, como destacado anteriormente numa proporção de 60% de metano para 40% de dióxido de carbono, o que desperta também a possibilidade de o lipídeo ser um grande formador dos afluentes que alimentam o sistema de degradação de matéria orgânica da ETE São João/Navegantes.

Por fim, o biogás mantém, através do poder calorífico obtido para composições conhecidas, sua posição como gás combustível em potencial e traz consigo a oportunidade de pensar em destinos mais adequados para os produtos da digestão anaeróbia, de modo a impactar positivamente o meio ambiente, reduzir o impacto das inúmeras toneladas de lodo despejadas em aterros sanitários anualmente e mitigar o risco de possíveis acúmulos do gás metano na atmosfera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARRASCAL, M.; SÁNCHEZ-JIMENEZ, E.; FANG, J.; PÉREZ-LÓPEZ, C.; GINEBRED, A.; BARCELÓ, D.; ABIAN, J. **Sewage protein information mining: discovery of large biomolecules as biomarkers of population and industrial activities.** Environ Sci Technol, 2023.
- CARVALHO, C.; RIBEIRINHO, V.; DE ANDRADE, C.; GRUTZMACHER, P.; PIRES, A. **Composição química da matéria orgânica de lodos de esgoto.** Agrária - revista brasileira de ciências agrárias. v.10, n.3, p.413-419, 2015.
- CAVALCANTI, O. **Avaliação da produção de biogás a partir da digestão de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) da UFRN.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019.
- CERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios.** 2ª ed. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- CERNICHARO, C. A. L.; **Reatores anaeróbios,** Editora UFMG, 2ª edição, 2019.
- DA SILVA, A. L.; HECK, N. C. **Potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás das estações de tratamento de esgoto de Porto Alegre.** VI Seminário sobre Tecnologias Limpas, 2015.
- DOS SANTOS, V.; SILVA, L.; DE SOUZA, F.; DOS SANTOS, D.; BRITO, A. **Avaliação da eficiência na remoção de DQO E DBO em um reator UASB de fluxo ascendente e manta de lodo.** Revista verde de agroecologia e desenvolvimento sustentável, v. 7, n. 2, p.16-20, 2012.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2003). Síntese de indicadores sociais 2002.
- KOGA, P., POSSETTI, G.R.C., RIETOW, J.C., AMARAL, K.J., GRAVER, A.. **Geração de energia renovável em uma estação de tratamento anaeróbio de esgotos domésticos.** 2015.
- KUNZ, A; STEINMETZ, R. L. R.; DO AMARAL, A. C.; **Fundamentos da Digestão Anaeróbia, Purificação do Biogás, Uso e Tratamento do Digestato,** Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019.
- MARTINS, C.; GUIMARÃES, E.; RAMIRES, S.; SARTORI, M. **Análise comparativa: geração de energia através do lodo residual de duas estações de tratamento de esgoto doméstico de São Paulo e Paraná.** Universidade Metodista de São Paulo, 2018.
- MORAN, M.; SHAPIRO, H.; BOETTNER, D.; BAILEY, M. **Princípios de termodinâmica para engenharia.** LTC Livros Técnicos e Científicos Ltda. Rio de Janeiro, 2013.
- MOURA, L.; THEWES, M.; RINKER, D.; GOMES, J. **Potencial energético e agrícola de lodo de estações de tratamento de esgotos - ETES: estudo de caso do lodo da ETE Serraria.** Encarte Ecos Técnica nº 11, 2020.
- Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental **PROBIOGAS: Guia Técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto.** Ministério das Cidades, 2015.
- SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019,** 2020.
- SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2021, 2022.
- ZHU, F.; WU, X.; ZHAO, L.; LIU, X.; QI, J.; WANG, X.; WANG, J. **Lipid profiling in sewage sludge.** Water Research, v.116, p.149-158, 2017.
- Dados também foram obtidos através de contato com a coordenação do DMAE em 2023.