



AGNES DOMICIANO DA COSTA

**ESTUDO DO POTENCIAL TEÓRICO DE PRODUÇÃO DE
METANO E POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA UFLA.**

LAVRAS – MG

2021

AGNES DOMICIANO DA COSTA

**ESTUDO DO POTENCIAL TEÓRICO DE PRODUÇÃO DE METANO E
POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES DA UFLA.**

Trabalho de Conclusão de Curso, em modalidade de artigo científico, apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

Dr. Luciene Alves Batista Siniscalchi

Orientadora

LAVRAS –MG

2021

AGNES DOMICIANO DA COSTA

**ESTUDO DO POTENCIAL TEÓRICO DE PRODUÇÃO DE METANO E
POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES DA UFLA.**

**STUDY OF THE THEORETICAL POTENTIAL OF METHANE PRODUCTION AND
ENERGY GENERATION OF THE WASTEWATER TREATMENT PLANT AT
UFLA UNIVERSITY CAMPUS**

Trabalho de Conclusão de Curso, em modalidade de artigo científico, apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

Dr. Paula Peixoto Assemany, UFLA

Dr. Jacineumo Falcão de Oliveira, membro externo

Dr. Luciene Alves Batista Siniscalchi

Orientadora

LAVRAS –MG

2021

AGRADECIMENTOS

A Deus e ao meu Santo Anjo, por terem me concedido discernimento, força e resiliência para superar todos os desafios encontrados;

Aos meus pais Marcos e Elizabeth, e minha irmã Agata, por terem sido minha base e aconchego durante os momentos difíceis, sempre me motivando a dar o meu melhor, e acreditando no meu potencial;

Ao meu namorado e parceiro de vida Ivan, por estar ao meu lado em todos os momentos, em prontidão para me ajudar e me acolher com tanto amor;

À toda minha família: meus avós, madrinha, tios e em especial, minhas primas por todo cuidado, preocupação e aprendizagens;

À minha professora Luciene por ter sido imprescindível para a construção do meu conhecimento, e muito mais que apenas orientadora, tornando-se uma pessoa pelo qual tenho muita admiração e carinho.

Aos professores do DAM, em especial Mateus Matos, Fátima Fia e Ronaldo Fia, por terem contribuído com a minha formação e pelos dados disponibilizados para realização deste trabalho;

Ao Dyego, vice-diretor da DQMA, pela disponibilização das informações a respeito da ETE/UFLA e pela disposição e solucionar minhas dúvidas;

A todos os técnicos, em especial Juliana e Aline, e pessoal do laboratório com os quais cruzei durante a graduação, pelas lições e experiências trocadas.

Sem a contribuição de cada um de vocês, essa conquista não seria alcançada. A todos, meu sincero muito obrigada!

RESUMO

Na mesma proporção em que a sociedade se desenvolve, a demanda por energia cresce exponencialmente, ultrapassando inclusive a capacidade de suporte do planeta, trazendo como consequências o agravamento do efeito estufa e graves crises hídricas. Neste contexto, a busca por fontes de energia alternativas torna-se a solução ideal para reduzir os impactos causados pelas atividades humanas. Pautada pelo senso de urgência da necessidade de inovações ambientais, a Universidade Federal de Lavras é referência mundial em sustentabilidade, a qual conta inclusive com sua própria Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), que dispõe do tratamento anaeróbio como um dos mecanismos de remoção de matéria orgânica. Considerando o grande potencial de aproveitamento do biogás, subproduto da digestão anaeróbia, este trabalho teve como objetivo a determinação do potencial teórico de geração de metano e respectivo potencial de geração de energia na ETE/UFLA. O cálculo de gás produzido foi realizado com base na demanda química de oxigênio (DQO) removida durante o tratamento, a partir de dados de entrada e saída do efluente, em monitoramentos conduzidos na estação em uma série histórica de fevereiro de 2017 a maio de 2020. Os resultados determinaram um potencial mediano de geração de CH_4 de $12,62 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, valor que sofreu consideráveis variações durante o período estudado, sendo influenciado principalmente pelas características qualitativas e quantitativas do esgoto, como biodegradabilidade, vazão, tempo de detenção hidráulica, que determinaram a eficiência de remoção de matéria orgânica, e pelo fluxo de pessoas nas dependências da universidade, já que nos períodos de férias houve uma redução na vazão de biogás. Em relação ao potencial de geração elétrica, foi constatado que a ETE/UFLA seria capaz de produzir em média $43,62 \text{ kWh d}^{-1}$, suprimindo cerca de 87% da demanda geral da estação, o que a tornaria praticamente autossuficiente em termos energéticos. A economia gerada com a aplicação desta tecnologia seria de até R\$ 9.202,51 por ano, valor que poderia ser reinvestido em melhorias na estrutura da ETE, e em novas pesquisas, além de contribuir para a redução na emissão de gases tornando-se um exemplo de sistema de tratamento de baixo impacto e alta eficiência.

Palavras-chave: Biogás, Tratamento anaeróbio, Geração distribuída, Bioenergia.

ABSTRACT

As society develops, the demand for energy grows exponentially, surpassing the planet's support capacity, resulting in the aggravation of the greenhouse effect and serious water crises. In this context, the search for alternative energy sources becomes the ideal solution to reduce the impacts caused by human activities. Guided by the urgency sense of the need for environmental innovations, the Federal University of Lavras is a world reference in sustainability, which also has its own wastewater treatment plant (WWTP), which uses anaerobic treatment as one of the mechanisms for removing organic matter. Considering the great potential for biogas reusing, a by-product of anaerobic digestion, this work aims to determine the theoretical methane generation potential and energy generation potential of UFLA's treatment station. The calculation of the produced gas was performed based on the Chemical Oxygen Demand (COD) removed during treatment, from effluent input and output data, in monitoring conducted at the WWTP in a historical series from february of 2017 to march of 2020. The results determined a CH₄ generation potential of 12.62 m³.d⁻¹. This value is underwent considerable variations during the study period, being influenced by the qualitative and quantitative characteristics of the effluent, which attributes determined the efficiency of organic matter removal, and by the flow of people on the university campus, since during vacation periods there was a reduction in the flow of biogas. Regarding the electric generation potential, it was found that the WWTP would be capable to produce an average of 43.62 kWh.d⁻¹, supplying about 87% of it's general demand of the station, which would make it practically self-sufficient in energy terms. The savings generated by the application of this technology would be up to R\$ 9,202.51 per year, an amount that could be reinvested in improvements in the structure of the WWTP, and in new researches, in addition to contributing to the reduction of gas emissions, making it an example of a low-impact, high-efficiency treatment system.

Key words: Biogas. Anaerobic treatment. Distributed generation. Bioenergy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 - Tipologia das ETE's no Brasil	10
Figura 3-2 - Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia	12
Figura 3-4 - Consumo energético por fonte em anos selecionados	22
Figura 3-5 - Volume de biogás produzido e aplicação no território nacional.	24
Figura 6-1: Dados de concentração de DQO (mg L^{-1}) de entrada e saída da ETE/UFLA durante os anos de 2017 à 2020 – Dados DQMA	41
Figura 6-2: Série da produção teórica de metano na ETE/UFLA - Dados DQMA.....	43
Figura 6-3: Dados de concentração de DQO de entrada e saída da ETE/UFLA durante os anos de 2017 à 2020 – Compilado de trabalhos	44
Figura 6-4: Série da produção teórica de metano na ETE/UFLA- Dados compilados	45
Figura 6-5: Dados da produção teórica de metano ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$) durante os anos de 2017 à 2020. - Compilado de trabalhos.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Produção teórica de biogás para diferentes componentes no substrato.	13
Tabela 3-2 - Gêneros mais relevantes para cada etapa da digestão anaeróbia	14
Tabela 3-5 - Constantes cinéticas para vários substratos durante o tratamento anaeróbio.....	16
Tabela 3-3 - Composição química do biogás	19
Tabela 3-4 - Correspondência de 1m ³ de biogás para os demais combustíveis do mercado....	21
Tabela 3-6 – Compilação estudos de produção de metano	28
Tabela 5-1: Parâmetros utilizados para os cálculos.....	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	OBJETIVOS	8
2.1	Geral	8
2.2	Específicos	8
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3.1	Histórico da digestão anaeróbia	9
3.2	Etapas da digestão anaeróbia	10
3.3	Biomassa Microbiana	13
3.4	Fatores limitantes da Digestão Anaeróbia	15
3.5	Biogás	18
3.6	Matriz Energética Brasileira	21
3.7	Aproveitamento do Biogás no Brasil	23
3.8	Estudos da produção de biogás (teórico e prático)	25
3.9	Sustentabilidade e a UFLA	29
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
	ARTIGO I– ESTUDO DO POTENCIAL TEÓRICO DE PRODUÇÃO DE METANO E POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA UFLA.	33
1	INTRODUÇÃO	35
2	METODOLOGIA	37
2.1	Área de estudo	37
2.2	Coleta e tratamento de dados	37
2.3	Cálculo da produção de biogás	38
2.4	Aproveitamento energético	39
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
3.1	Monitoramento realizado pela DQMA	41
3.1.1	Dados de entrada	41
3.1.2	Potencial teórico de produção de metano	42
3.1.3	Potencial de produção de energia	43
3.2	Compilado de trabalhos realizados e/ou publicados referentes à ETE-UFLA	43
3.2.1	Dados de entrada	43
3.2.2	Potencial teórico de produção de metano	45
3.2.3	Potencial de produção de energia	48
4	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1 INTRODUÇÃO

Sendo o processo mais aplicado em todo o mundo, o tratamento anaeróbio além de apresentar alta eficiência na remoção de matéria orgânica biodegradável, evidencia um bom custo benefício, e a possibilidade de aproveitamento econômico de seus subprodutos (ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS., 2020).

Apesar de ser considerado um sistema simples por não requerer oxigênio e consequentes gastos com energia, a digestão anaeróbia pode tornar-se complexa, já que os microrganismos responsáveis pelo processo são facilmente afetados pelas condições do ambiente, tanto qualitativas como quantitativas (WANG et al., 2018). Portanto, é muito importante o conhecimento de todas as fases e fatores limitantes das mesmas.

O tratamento de resíduos ou efluentes inicia-se pela hidrólise, na qual enzimas proporcionarão a quebra da matéria orgânica particulada em compostos de mais fácil absorção nas membranas da cultura presente. Em seguida, a partir da acidogênese, a matéria orgânica hidrolizada por exoenzimas é fermentada a ácidos orgânicos, que posteriormente, na acetogênese, serão convertidos à principal matéria prima para produção do gás metano: acetato, hidrogênio e gás carbônico. Já em sua última fase, na metanogênese, estes compostos são finalmente processados, produzindo o subproduto de maior interesse, o metano, que se desprende da fase líquida para compor em média 60% do biogás gerado pelo tratamento anaeróbio (CHERNICHARO, 2007).

Este gás é de extremo interesse, principalmente pelo seu alto poder calorífico, que quando submetido à queima, é capaz de substituir outras fontes de energia como o gás natural, petróleo (combustíveis) e hidrelétricas (UDAETA et al., 2019). É sabido dos grandes impactos causados pelas fontes fósseis mais exploradas atualmente, responsáveis pelo agravamento das mudanças climáticas, e até ameaçadas pela escassez, no caso das gerações hídricas. Visto a necessidade de evolução e busca por fontes alternativas de energia, o biogás possui um grande potencial a ser explorado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS - ABIOGÁS, 2020).

No quesito busca por soluções limpas e inovação, a Universidade Federal de Lavras destaca-se, sendo eleita em 2020 pelo Greenmetric World University Ranking como a segunda instituição de ensino mais sustentável da América Latina, reconhecida com diversos prêmios nacionais e internacionais por suas iniciativas ambientais (AVELAR, 2020). Um grande exemplo de sua priorização pela qualidade no meio ambiente e favorecimento ao estudo é a Estação de Tratamento de Efluentes da UFLA, que opera desde 2016 recebendo grande parte

de todo o esgoto produzido em suas dependências, servindo como um laboratório para os estudantes de graduação, e contribuindo para a não contaminação da região (PAEZ, 2019).

Apesar da presença do tratamento anaeróbio com estrutura para coleta de biogás, procedimento de coleta ainda não ocorre. aproveitamento do biogás, que não é armazenado nem queimado. Com um aprofundamento no conhecimento no processo e capacidade de produção de metano, a ETE poderia ser capaz de produzir sua própria energia, contribuindo ainda mais para o destaque da UFLA como exemplo em sustentabilidade.

Visando justamente fornecer conhecimento sobre a capacidade de geração ou economia em receita energética, além de reduzir a emissão de carbono, produzir energia limpa e aumentar as possibilidades de desenvolvimento de pesquisas, este trabalho traz como objetivo a determinação teórica do potencial de produção de metano da ETE/UFLA e consequente potencial de produção de energia.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Determinar o potencial teórico de produção de metano da Estação de Tratamento de Esgoto da Universidade Federal de Lavras (ETE-UFLA).

2.2 Específicos

Levantar dados de literatura sobre a vazão de entrada e eficiência de remoção de matéria orgânica da ETE-UFLA no período de 2017 a 2020;

Determinar o potencial de geração de energia elétrica da Estação de Tratamento de Esgoto da UFLA a partir do metano produzido;

Relacionar os resultados calculados com dados primários de outros trabalhos na ETE-UFLA, e sistemas anaeróbios similares.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Histórico da digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia pode ser definida como um sistema em constante busca por equilíbrio, conduzido por diversas reações químicas promovidas por metabolismos complexos. Este processo de oxidação da matéria orgânica acontece na ausência de oxigênio, ou seja, em ambientes anaeróbios. Neste micro ecossistema, diversas espécies de microrganismos processam a matéria particulada e a convertem em biogás (metano, gás carbônico, gás sulfídrico), água e biomassa (CÁRDENAS et al., 2016; ROSA et al., 2016).

Este processo anaeróbio vem sendo aplicado para o tratamento de águas e resíduos em geral para municípios e indústrias a mais de um século. Já desde muitos anos antes do desenvolvimento das tecnologias aplicadas atualmente, se tinha a perspectiva de aproveitamento dos subprodutos, em destaque o metano para produção de energia (MCCARTY; SMITH, 1986).

Há registros das primeiras tentativas de aplicação da digestão anaeróbia ainda no século XIX, quando em 1857 foi relatado pela primeira vez um tanque projetado para reter sólidos por meio da sedimentação, um projeto similar à fossa séptica (BUSWELL, 1958). Neste mesmo sentido, em 1860 o engenheiro francês Louis H. Moura construiu uma câmara fechada capaz de transformar a matéria orgânica, descrito posteriormente de forma oficial em um relatório no ano de 1881 por Abbé Moigno (SEGHEZZO et al., 1998).

Com o decorrer dos anos, o aumento no custo da energia na década de 1970 fez com que as atenções voltassem para a digestão anaeróbia, quando a pesquisa deste sistema foi incentivada como nova alternativa de tratamento, que teria grande potencial em eficiência produtiva e econômica (LETTINGA, 1995; SEGHEZZO et al., 1998).

Atualmente, a digestão anaeróbia é o atual tratamento mais aplicado do mundo, sendo que, segundo a ANA - Agência Nacional de Águas (2020), no Brasil, das 3.668 Estações de Tratamento de Esgoto (ETE's) espalhadas por todo território nacional, cerca de 37% têm os reatores anaeróbios como principal estrutura de remoção de matéria orgânica. Além disso, como demonstra a Figura 3-1, outra grande porcentagem dos demais tratamentos aplicados contam com a digestão anaeróbia como complemento ao processo de tratamento, então, apesar da separação em subtópicos, é possível aferir que quase 80% de todo o tratamento de efluente nacional aplica o princípio da digestão anaeróbia.

Figura 3-1 - Tipologia das ETE's no Brasil



Fonte: ANA (2020)

3.2 Etapas da digestão anaeróbia

Apesar da digestão anaeróbia ser conhecida como um sistema simples, existem etapas e reações que devem ser estudadas para que o processo ocorra de forma eficiente. O desequilíbrio de algumas variáveis pode resultar na falha, já que este processo biológico é conduzido por microrganismos sensíveis (LECKER et al., 2017).

A digestão anaeróbia constitui do processamento de matéria orgânica à partículas menores, posteriormente convertidas em energia e novas células por meio de organismos específicos. Este desenvolvimento das espécies se dá por meio da respiração, que além de ser aplicada para formação de metano a partir do CO_2 , também pode utilizar o NO_3^- como aceptor de elétrons para redução de nitrato, e até o SO_4^{2-} para redução de sulfato (CHERNICHARO, 2007).

Ressalta-se que, além de ambientes controlados, como em estações de tratamento de esgoto, há produção natural de metano em pântanos, solo, sedimento de rios, lagos, mares e órgãos digestivos de animais ruminantes, diferentes situações que no geral, seguem o mesmo processo, que pode ser descrito em quatro principais etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (CHERNICHARO, 2007).

A primeira fase da digestão anaeróbia é a hidrólise, processo no qual exoenzimas excretadas por bactérias fermentativas hidrolíticas agem no processamento da matéria orgânica particulada (carboidratos, proteínas, lipídeos), reduzindo-a à matéria orgânica na forma dissolvida ou menos complexa (açúcares, aminoácidos, peptídeos). A partir deste processo, as partículas então tornam-se capazes de atravessar a parede celular dos microrganismos responsáveis pela acidogênese. Englobados neste processo, existem diferentes espécies de microrganismos capazes de processar diversos tipos de substratos, cada um com sua especialidade. Vale citar também, que a hidrólise, em relação às demais fases, dependendo do tipo de substrato, ocorre de forma lenta, sendo portanto, um limitante da velocidade de remoção de DQO (LECKER et al., 2017).

Finalizada a hidrólise, os compostos simplificados são processados no interior das bactérias fermentativas durante a acidogênese, na qual os açúcares, aminoácidos e peptídeos são convertidos à ácidos orgânicos (ácido acético, propiônico, butírico), álcoois, cetonas, dióxido de carbono, hidrogênio e novas células bacterianas (LECKER et al., 2017). Nesta fase, deve-se atentar ao acúmulo de ácidos, que podem reduzir o pH e influenciar negativamente os processos subsequentes, principalmente a metanogênese. Porém, quanto mais mistas e adaptadas as culturas de um determinado sistema, menores as consequências das variantes externas (RACHBAUER et al., 2017).

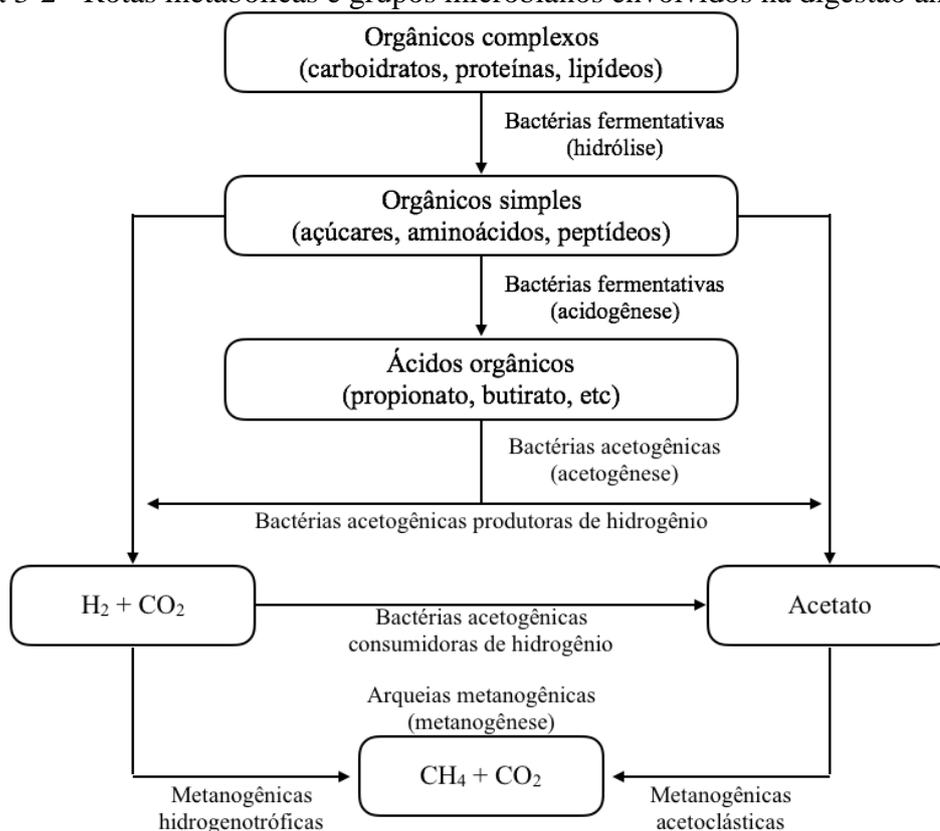
Já na acetogênese, os ácidos orgânicos produzidos anteriormente são oxidados pelas bactérias acetogênicas, convertendo-os principalmente em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Um detalhe importante nesta etapa constitui do fato que há o risco da acidificação do ambiente devido à significativa produção de H_2 . Além disso, se no sistema houver presença de hidrogênio dissolvido e/ou acetato, a reação pode ser inibida. Assim, dá-se grande relevância aos microrganismos consumidores destes dois compostos, que são melhor descritos na próxima fase (CHERNICHARO, 2007).

Por fim, a metanogênese é a última etapa da digestão anaeróbia, responsável pela remoção de DQO da solução, já que esta é convertida principalmente em gás metano, que por possuir baixa solubilidade em água é despreendido. Os microrganismos metanogênicos responsáveis por esse processo, por apresentarem características diferenciadas, são denominados arqueias. Este grupo sobrevive a condições específicas de umidade, temperatura e são sensíveis a alterações no ambiente, além de particularidades em sua estrutura de parede celular, membrana e RNA polimerase, por exemplo (CHERNICHARO, 2007). Estas arqueias

são sensíveis à diversos compostos, e seletivas quanto ao substrato a consumir, limitando-se à ácido acético, hidrogênio, dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono. Além disso, são responsáveis por remover o excesso de hidrogênio, contribuindo para o equilíbrio da etapa da acetogênese (RACHBAUER et al., 2017).

Discutidos todos os principais fluxos da digestão anaeróbia, na Figura 3-2, Chernicharo (2007) traz uma tabela que resume de forma didática todos os tópicos descritos anteriormente.

Figura 3-2 - Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia



Fonte: CHERNICHARO (2007)

Existem diversas espécies de arqueias metanogênicas já catalogadas, sendo elas divididas em dois grandes grupos: as metanogênicas acetoclásticas e metanogênicas hidrogenotróficas, que diferenciam-se pela fonte de carbono, fonte de energia e acceptor de elétrons. As bactérias acetoclásticas são predominantes, responsáveis por até 70% da produção total de metano. Estas utilizam o acetato como fonte de carbono e energia, produzindo gás carbônico e metano. Por outro lado, as bactérias hidrogenotróficas, menos presentes, aproveitam o gás carbônico como fonte de carbono e acceptor de elétrons, e o hidrogênio como fonte de energia (CHERNICHARO, 2007; RACHBAUER et al., 2017).

No sentido de compreender melhor o equilíbrio de algumas reações metanogênicas, WANG et al., (2018) apresenta a Tabela 3-1 com as reações, produção de biogás e porcentagem de metano no mesmo para 3 tipos de componentes: lipídeos, carboidratos e proteínas.

Tabela 3-1 - Produção teórica de biogás para diferentes componentes no substrato.

Componente	Reação Metanogênica	Biogás (L g ⁻¹)	CH ₄ (%)
Lipídeos	$C_{50}H_{90}O_6 + 24,5H_2O \rightarrow 34,75CH_4 + 15,25CO_2$	1,425	69,5
Carboidratos	$C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2$	0,83	50
Proteínas	$C_{16}H_{24}O_5N_4 + 14,5H_2O \rightarrow 8,25CH_4 + 3,75CO_2 + 4NH_4^+ + 4HCO_3^-$	0,921	68,8

Fonte: (WANG et al., 2018)

Como um processo paralelo, as bactérias redutoras de sulfato são competidoras diretas às bactérias metanogênicas, sendo também capazes de utilizar como substrato o acetato e hidrogênio para a oxidação de compostos orgânicos a base de enxofre. Por serem muito adaptativas, a depender da concentração de compostos de sulfato no ambiente (efluente, resíduos sólidos), estas bactérias podem predominar no processamento da DQO, porém, com a grande desvantagem de gerar um subproduto tóxico, o gás sulfídrico, que apresenta propriedades corrosivas e mau odor, devendo, portanto, ser evitado.

3.3 Biomassa Microbiana

A eficiência do tratamento anaeróbio está intimamente ligada à característica dos microrganismos presentes, mais especificadamente as espécies, como elas se inter-relacionam e qual a estabilidade destas dentro do sistema, para que o contato alimento/organismo seja garantido. Um requisito chave para entender o potencial de produção de metano e identificar possíveis falhas é justamente conhecer quais os principais microrganismos presentes no sistema (WANG et al., 2018). Um compilado de algumas das principais espécies responsáveis pela digestão anaeróbia encontra-se na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 - Gêneros mais relevantes para cada etapa da digestão anaeróbia

Etapa da DA	Gêneros
Hidrólise	<i>Clostridium, Micrococcus, Staphylococcus, Bacteroides, Butyvirbio, Fusobacterium, Selenomonas, Eubacterium, Acetivibrio</i>
Acidogênese	<i>Clostridium, Bacteroides, Ruminococcus, Butyribacterium, Propionibacterium, Eubacterium, Lactobacillus, Escherichia, Pseudomas</i>
Acetogênese	<i>Syntrophobacter, Syntrophomonas</i>
Metanogênese	Acetoclásticas <i>Methanosarcina, Methanosaeta</i>
	Hidrogenotóxicas <i>Methanobacterium, Methanospirillum, Methanobrevibacter, Methanoculleus, Methanocorpusculum</i>

Fonte: (CHERNICHARO, 2007; WANG et al., 2018)

Por estar em escala microscópica, a avaliação desta biomassa torna-se difícil, portanto, faz-se de forma aproximada a partir da análise dos sólidos voláteis do lodo coletado nas diversas alturas de uma estrutura de tratamento. A mensuração da biomassa em um reator dá-se pela multiplicação do volume do mesmo pela concentração de lodo total, podendo ser segmentada em diferentes alturas (CHERNICHARO, 2007).

Uma forma complementar a compreensão do processo de multiplicação das células bacterianas e prever a necessidade destas por substrato é a partir da cinética bioquímica, que fornece valores de velocidade de crescimento de microrganismos, de consumo de substrato e até de formação de produtos (SALÉH; CAMPOS; FIGUEIREDO, 2009). Estas reações, por serem influenciadas por diversos parâmetros externos e internos, foram simplificadas formando modelos pré determinados, por exemplo, determinaram o coeficiente de crescimento bacteriano (Y) como $0,5914 < Y < 0,8214$ e a taxa máxima de crescimento ($\mu \text{ máx}^{-1}$) $0,1811 < \mu < 0,2516$ para tratamento de efluente de laticínio com reator *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) (SALÉH; CAMPOS; FIGUEIREDO, 2009).

Ainda no contexto de produção de novas células durante a degradação da matéria orgânica na digestão anaeróbia, é interessante entender que sempre há um balanço de massa, ou seja, existe uma relação linear entre anabolismo e catabolismo. Além disso, cada comunidade tem sua própria curva de consumo de carbono e hidrogênio. Descrevendo de forma geral, para cada mol de metano gerado, são formadas 2g de células (FUCHS, G., THAUER, R., ZIEGLER, 1979; LECKER et al., 2017). Existe uma proporção média em que cerca de 0,28%

a 0,43% do H₂ e 3% do CO₂ são convertidos em biomassa (LECKER et al., 2017; WISE, D.L., COONEY, C.L., AUGENSTEIN, 1978).

Além da espécie e cinética de produção de biomassa, a interação dos microrganismos com sua fonte de crescimento e garantia da sobrevivência dos mesmos depende de como a cultura vai se adaptar ao ambiente, ou seja, de como ela será retida. Neste contexto, existem 4 principais tipos de retenção, que ocorrem simultaneamente em todas as estruturas de tratamento. A primeira delas é a retenção por adesão, na qual como o próprio nome indica, as bactérias aderem-se à superfície do reator por meio de um biofilme. Além desta, existe a retenção por floculação, onde os organismos formam flocos, que contribuem para a redução de sólidos suspensos no produto final do tratamento. A retenção intersticial acontece entre os intervalos dos biofilmes formados por adesão, de forma mais dispersão. E, por fim, a retenção por granulação, é o agrupamento das espécies de forma mais seletiva, formando grânulos esféricos e densos, muito encontrado e reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) (CHERNICHARO, 2007).

3.4 Fatores limitantes da Digestão Anaeróbia

Para garantir o equilíbrio do processo de digestão anaeróbia (DA) e consequente eficiência na remoção de matéria orgânica, deve-se ter conhecimento e realizar o monitoramento de alguns fenômenos físico, químico e biológicos (RACHBAUER et al., 2017).

Um importante âmbito a se ter conhecimento é a cinética das culturas, cada fase da DA apresenta limitações, que se ultrapassadas, causam desequilíbrio em todo o sistema. Na Tabela 3-3, observa-se alguns dados relevantes sobre os microrganismos responsáveis pelas etapas da digestão. A partir da constante de saturação (K_s), é possível notar que os organismos acetogênicos e metanogênicos saturam-se de forma mais rápida, o que pode gerar acúmulo de ácido acético. Além disso, a taxa de crescimento ($\mu_{máx}$) e coeficiente de produção de biomassa (Y) da primeira fase é muito maior do que das duas últimas, o que sugere que, a depender da situação ambiente, as acetogênicas e metanogênicas tornam-se um limitante para produção de metano (AQUINO; CHERNICHARO, 2005; CHERNICHARO, 2007).

Tabela 3-3 - Constantes cinéticas para vários substratos durante o tratamento anaeróbio

Substrato	Etapa	K _{máx} (gDQO.(gSSV d) ⁻¹)	K _s (mg DQO L ⁻¹)	μ _{máx} (d ⁻¹)	Y (gSSV(gDQO) ⁻¹)	K _d (d ⁻¹)
Carboidratos	Acidogênica	1,33 a 70,6	22,5 a 630	7,2 a 30	0,14 a 0,17	6,1
Ácidos de cadeia longa	Acetogênica	0,77 a 6,67	105 a 3.180	0,085 a 0,55	0,04 a 0,11	0,01 a 0,015
Ácidos de cadeia curta	Acetogênica	6,2 a 17,1	12 a 500	0,13 a 1,2	0,025 a 0,047	0,01 a 0,027
Acetato	Metanogênica	2,6 a 11,6	11 a 421	0,08 a 0,7	0,01 a 0,054	0,04 a
	Acetoclástica					0,037
H ₂ /CO ₂	Metanogênica	1,92 a 90	0,000048 a 0,6	0,05 a 4,07	0,017 a 0,045	0,088
	Hidrogenotrófica					

K_{máx}: taxa específica máxima de utilização do substrato

K_s: constante de saturação

μ_{máx}: taxa de crescimento específico máxima

Y: coeficiente de produção de biomassa

K_d: coeficiente de respiração endógena

Fonte:(AQUINO; CHERNICHARO, 2005; CHERNICHARO, 2007; PAVLOSTATHIS; GIRALDO-GOMEZ, 1991)

Deve-se também atentar às condições termodinâmicas, já que a acetogênese, por exemplo, ocorre na condição de equilíbrio ($\Delta G \pm 0$), e, altas concentrações de acetato e hidrogênio pode prejudicá-la. Outro grande influenciador é o tipo de reator, que afeta diretamente a cinética, termodinâmica, crescimento e transferência de massa. Reatores convencionais, como o UASB, por não haver alta floculação, dificultam a separação das fases da DA, o que torna o sistema mais susceptível à choques de vazão, carga orgânica e até a compostos tóxicos. Mas por outro lado, tem mistura, com maior contato entre alimento e microrganismo. Além disso, baixa limitação à transferência de massa, e boa capacidade de retenção de biomassa (CHERNICHARO, 2007).

Alguns outros fatores que influenciam a DA é o substrato, já que sua concentração (carga orgânica aplicada) afeta o metabolismo dos microrganismos, que pode ser desacelerado e até inibido. O lodo presente no reator também tem sua importância, já que é nele que estarão contidas as culturas responsáveis pela digestão anaeróbia. e, neste contexto, o tempo de aclimação, *start up* e a forma com que eles são conduzidos influenciam diretamente no prazo de alcance do equilíbrio no sistema (CÁRDENAS et al., 2016; CHOONG; CHOU; NORLI, 2018).

A presença vitaminas, macronutrientes e micronutrientes orgânicos e inorgânicos também pode determinar a eficiência do processo, e a necessidade de cada um deles é determinada pela composição dos microrganismos. Nesse sentido, Chernicharo (2007) e Lettinga (1995) destacam que é interessante que se tenha controle da proporção dos principais nutrientes em relação à matéria orgânica. Por exemplo, uma proporção aplicada para uma cultura de baixa produção celular para degradação de ácidos orgânicos voláteis é DQO : N : P = 1000 : 5 : 1; C : N : P = 330 : 5 : 1. Sendo N nitrogênio, P, fósforo, C, carbono e DQO, demanda bioquímica de oxigênio.

Em complemento, Cárdenas et al. (2016) destaca que de forma mais prática, tendo a possibilidade de um maior controle, as condições de operação devem ser monitoradas. A hidráulica do sistema, que engloba volume do reator, vazão, tempo de detenção hidráulica e mistura que se não ideais, podem ser limitantes para a distribuição, estabilização e contato dos microrganismos com o substrato favorecendo também a retenção da biomassa..

Somado a isso, um fator ambiental predominante na DA é a temperatura, da qual e para ela, existem duas possíveis faixas para produção de biogás: (1) termofílica (55 – 70° C) e (2) mesofílica (35 – 40° C). Esta última, mais aplicada, apesar de produzir um menor volume de

metano, apresenta melhor desempenho e estabilidade (CHOONG; CHOU; NORLI, 2018; LEVÉN; ERIKSSON; SCHNÜRER, 2007).

Os ajustes de temperatura e pH são imprescindíveis, e os microrganismos, em destaque os metanogênicos, trabalham em uma faixa muito reduzida de certas variáveis. O pH, por exemplo, deve estar próximo à neutralidade, entre 6,5 e 7,8. E, devido à alta produção de ácidos orgânicos na primeira fase e a possibilidade de acumulação dos mesmos, a alcalinidade do meio também deve ser monitorada (ideal de 2500 a 5000 mg L⁻¹). Quando esta se descontrola, são adicionados compostos como carbonato, bicarbonato, hidróxido e enxofre (CÁRDENAS et al., 2016; LEE et al., 2009).

Ademais, as características de biodegradabilidade do substrato determinam a facilidade ou não do processamento dos compostos presentes nas águas residuárias pelos reatores biológicos. Este conceito limita principalmente a hidrólise, que pode ser mais dispendiosa. Compostos lipídicos, por exemplo, não apresentam características favoráveis à DA, necessitando algumas vezes de um pré tratamento. Na medida que a biodegradabilidade pode desacelerar o processo, a toxicidade pode interrompê-lo. Substâncias como sais, amônias, sulfetos, metais e gorduras voláteis podem levar o sistema à críticas situações (CHERNICHARO, 2007; CHOONG; CHOU; NORLI, 2018).

3.5 Biogás

O biogás pode ser definido como uma combinação de gases provenientes da digestão anaeróbia, tendo como principais compostos o metano e dióxido de carbono. Dentre as diversas etapas do processo anaeróbio de digestão, este produto final advém da fermentação, na ausência de oxigênio e com a presença de algum substrato rico em matéria orgânica, podendo ser dejetos de animais, sobras de comidas, restos de poda, lixo orgânico em condições ideais de umidade e temperatura (CHOONG; CHOU; NORLI, 2018).

Configurando cerca de 60 a 80% da composição do biogás, o metano é um gás incolor, com alto poder calorífico, que produz uma chama lilás durante sua queima, sem produzir fuligem e com pouca emissão (JACOBOWSKI, 2018). Além disso, é insolúvel em águas, desprendendo-se facilmente da fase líquida, diferentemente do gás carbônico, que é liberado parte dissolvido, e parte no biogás. As duas principais equações que descrevem a formação deste relevante gás são descritas por Chernicharo (2007). A reação (3-1) ocorre na ausência de hidrogênio, quando o ácido acético é reduzido à metano, e o grupo carboxílico é oxidado à gás

carbônico. Já a reação (3-2) ocorre na presença de hidrogênio, pela qual o gás carbônico é oxidado para conversão em metano (CHERNICHARO, 2007).



Quanto maior a porcentagem de metano, maior o potencial de produção de energia e a compressibilidade do gás (média de 0,9970 para o biogás), que determina a necessidade em volume de armazenamento (ZANK et al., 2020). O produto gasoso da digestão anaeróbia já possui naturalmente uma baixa densidade (cerca de $1,2022 \text{ kg(m}^3\text{)}^{-1}$), o que torna seu armazenamento, transporte e operação para geração de energia um desafio (BUDZIANOWSKI; WYLOCK; MARCINIAK, 2017). Contudo, com o conhecimento das características do biogás, é possível inclusive aplicá-lo como substituto ao gás natural, estratégia já muito aplicada em diversos países do mundo (FEROLDI et al., 2017). A Tabela 3-4 apresenta uma composição química média do biogás.

Tabela 3-4 - Composição química do biogás

Composto	% na Mistura Gasosa
Metano (CH ₄)	50 a 75
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 a 40
Hidrogênio	1 a 3
Nitrogênio (N ₂)	0,5 a 2,5
Oxigênio (O ₂)	0,1 a 1
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	0,1 a 0,5
Amoníaco (NH ₃)	0,1 a 0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0 a 0,1
Água (H ₂ O)	variável

Fonte: (ZACHOW, 2000; ZANK et al., 2020)

Com o objetivo de potencializar a proporção de metano no biogás e reduzir a necessidade de purificação do mesmo para aplicação na produção de energia, Plugge (2017) afirma que para otimizar o processo constitui-se imprescindível conhecer a microbiota presente e suas interrelações, cinética das reações e a relação do tempo de funcionamento do reator, sendo o *start up* bem fundamentado essencial para uma boa estabilização do processo. Além disso, seu trabalho abordou o conceito de digestão autogerativa de alta pressão (AHPD), que se trata basicamente do acúmulo de pressão pela biomassa metanogênica, que aumenta a

solubilidade do CO₂, expandindo então a porcentagem de metano, que chega a altos teores de 90 a 95%. Este conceito é muito importante, pois pode ser aplicado no desenvolvimento de estruturas em menores escalas para aplicação da biodigestão e consequente produção de energia (PLUGGE, 2017).

Vale considerar, além de todas as metodologias a serem ponderadas para elevar a porcentagem de metano no biogás, a fração do CH₄ que permanece dissolvida na fração líquida. Esta afirmação se dá a partir da Lei de Henry, na qual, devido a pressão parcial no sistema, parte da fase gasosa é dissolvida na fase líquida (DE SOUZA, 2010). Alegação que aplica-se ao metano, que, a partir de sua supersaturação, segundo pesquisas realizadas por De Souza (2010), podem ocorrer perdas de CH₄ no efluente de 10 à 50% de todo o gás presente no biogás. Decréscimo que varia a partir do tempo de retenção hidráulica e carga orgânica, que, quanto melhor processada, maior o aproveitamento.

Outra característica do biogás importante a ser estudada é o poder calorífico, que define como será a conversão em energia a partir de balanços de massa, possibilitando também o conhecimento da viabilidade econômica do processo (ROSA et al., 2016). Com a presença significativa do metano e a ausência de composto corrosivos e tóxicos (H₂S e CO₂), o biogás pode ser aplicado no aproveitamento de energia em ETE's, propriedades rurais e até em veículos automotores (FEROLDI et al., 2017). O aumento da concentração de CH₄ é diretamente proporcional à elevação do poder calorífico. Uma composição química de 10% de CH₄ e 90% de CO₂ possui um potencial calorífico inferior (PCI) de 465,43 kcal kg⁻¹, já um biogás com 85% de CH₄ e 5% de CO₂ já eleva este PCI para 10469,60 kcal kg⁻¹ (AVELLAR, 2001; ZANK et al., 2020).

Definindo de forma mais prática como seria o aproveitamento deste poder calorífico, que varia entre 5000 a 7000 kcal m⁻³, tem-se a Tabela 3-5 que demonstra à que 1 m³ de biogás com 60 à 80% de metano pode corresponder, comparado a outros combustíveis.

Tabela 3-5 - Correspondência de 1m³ de biogás para os demais combustíveis do mercado.

0,61 litros de gasolina
0,55 litros de óleo diesel
0,57 litros de querosene
0,57 litros de querosene
0,45 kg de gás liquefeito
0,79 litros de álcool combustível
1,538 kg de lenha
1,428 kwh de energia elétrica

Fonte: (DEGANUTTI et al., 2002)

3.6 Matriz Energética Brasileira

Conhecido todo o processo básico envolvido na digestão anaeróbia e o potencial de seus subprodutos, cabe agora entender como ele pode ser aplicado na atualidade.

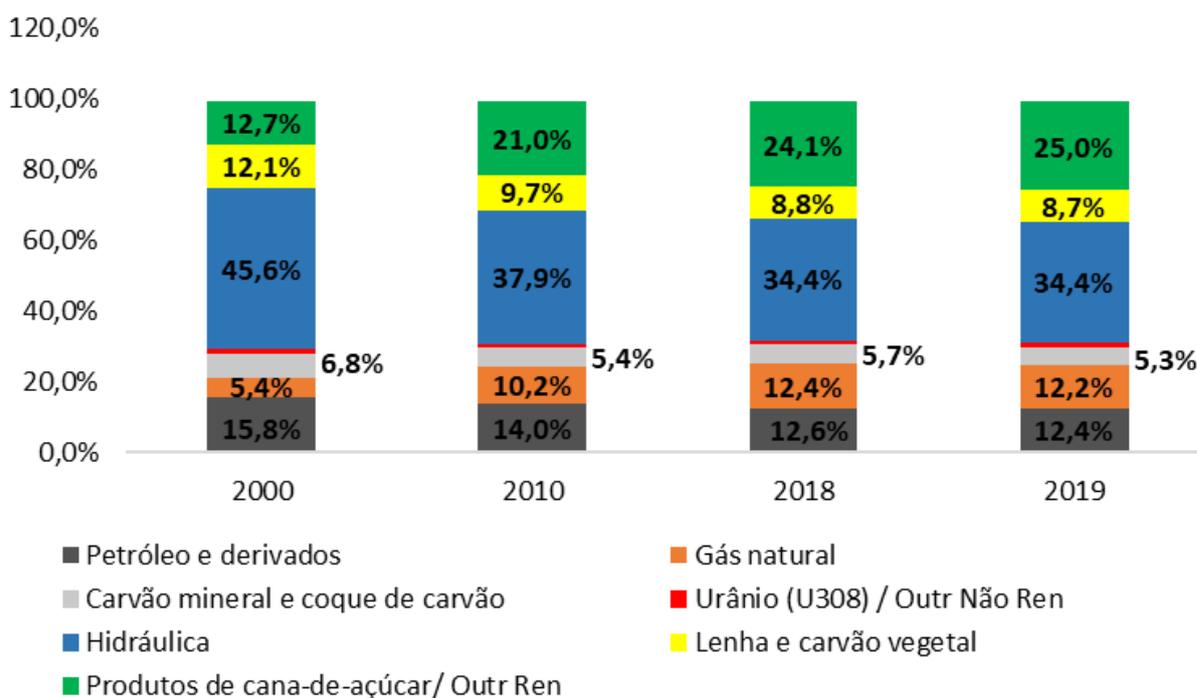
O fornecimento de energia está fortemente relacionado com o desenvolvimento da sociedade, já que a maior parte deste abastecimento é voltado para a cadeia produtiva nacional. Porém, da mesma forma que a evolução é necessária, deve-se sempre discutir o conceito de sustentabilidade ambiental, social e econômica, a fim de equilibrá-la com a preservação do meio ambiente (JACOBOWSKI, 2018).

Para discutir perspectivas de como essa dinâmica de produção e consumo de energia pode vir a causar o mínimo impacto negativo possível, é importante entender como ela funciona agora. Assim, traz-se algumas informações a respeito da matriz energética brasileira, que representa as fontes de energias aplicadas para o transporte, preparo de alimentos, geração de energia elétrica, dentre outros usos (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020).

Atualmente, 48,4% de toda a matriz energética do Brasil é composta por fontes renováveis, sendo que no ano de 2020 houve um acréscimo na contribuição da biomassa (bagaço de cana) e biodiesel e uma redução de 5,6% no consumo de petróleo e derivados. Este favorável progresso, dentre outros motivos, se dá pelos avançados possibilitados pela Lei n° 13.263, de 23 de março de 2016, que em 2019 incentivou a aprovação dos 11% de biodiesel aplicado em todo diesel distribuído em território nacional. Vale citar que, devido à pandemia, esta porcentagem reduziu-se para 10% em 2020 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021).

Afim de entender melhor como estas energias renováveis são distribuídas, traz-se a Figura 3-3, com uma perspectiva de consumo energético por fonte de 2000 até 2019.

Figura 3-3 - Consumo energético por fonte em anos selecionados.



Fonte: (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020)

Além das fontes citadas acima, dos 48,4% renovável da matriz energética nacional, 7,7% é descrito como “Outras renováveis”. Nesta classificação, estão inseridos lixívia (43,1%), biodiesel (23,8%), energia eólica (22,1%), energia solar (4,2%), biogás (1,4%) e gás industrial de carvão vegetal (0,4%). Apesar de pouco significativo em relação à matriz como um todo, há boas perspectivas quanto à aplicação do biogás, visto que de 2019 para 2020 seu consumo obteve um acréscimo de 15,7% (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021).

Comparado à métrica energética mundial, a matriz energética brasileira é cerca de três vezes mais sustentável, resultado das hidroelétricas que dominam esse mercado. A Política Nacional Energética, por exemplo, tem como um de seus objetivos utilizar fontes alternativas de energia e incentivar a geração de energia elétrica a partir de fonte limpas. A Agência Nacional de Energia Elétrica define redução de tarifas para sistemas de transmissão e distribuição de fontes renováveis. A Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004 e o Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004 regulamentam a comercialização de energia elétrica proveniente de quaisquer fontes. E por último, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA), instituído em 2002 fornece apoio à inserção de fontes alternativas de energia de pequeno e médio porte. Estes e outros exemplos, apresentam uma boa perspectiva para a matriz energética

brasileira, que apesar dos avanços, ainda tem muito que reduzir nas emissões de carbono (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021; JACOBOWSKI, 2018; RABELO, 2019).

3.7 Aproveitamento do Biogás no Brasil

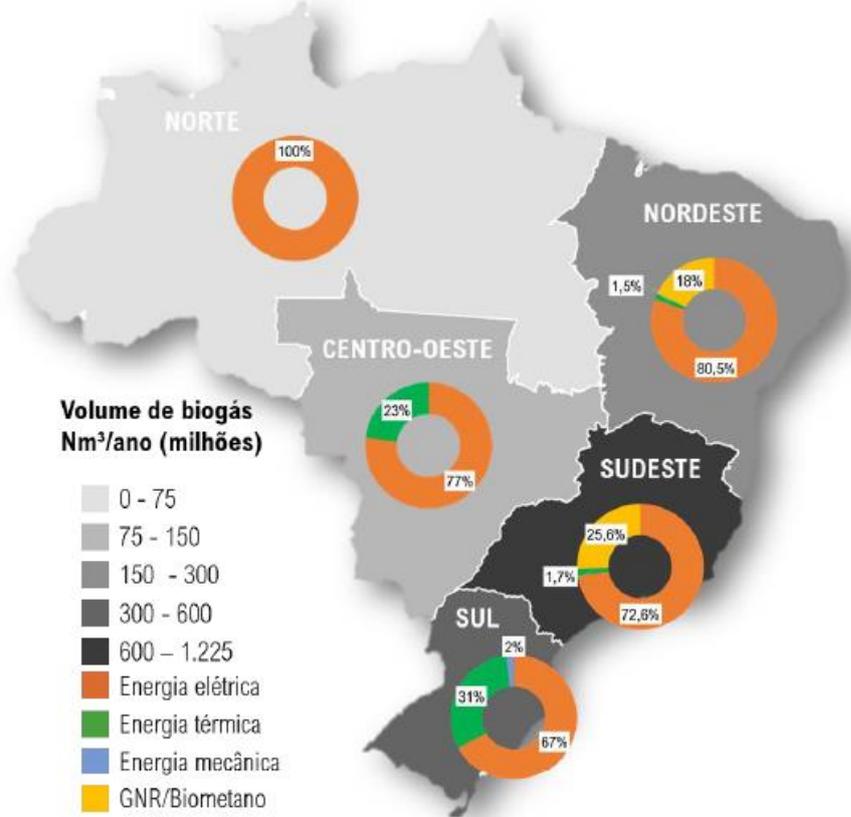
A matriz energética brasileira, em relação à grande maioria dos países no mundo, possui considerável porcentagem de energia renovável, e grande variabilidade. Porém, as maiores fontes de energia ainda são hidráulicas e derivados de petróleo. Visto as complicações climáticas com o agravamento do efeito estufa, e a crise hídrica que já afeta diversos estados no Brasil, problemas na distribuição de energia tendem a se tornar cada vez maiores. Uma boa alternativa para essa questão é a intensificação na diversificação da matriz, onde o aproveitamento do biogás se torna muito promissor, já que, biodigestores, por exemplo, são capazes de reduzir em até 90% da emissão de CO₂ (JACOBOWSKI, 2018).

Segundo a Associação Brasileira do Biogás - ABIOGÁS (2020), o Brasil possui um potencial de 82,58 bilhões de metros cúbicos de produção de biogás ao ano, um valor que representa cerca de 2% do que é atualmente consumido, um montante de 1,83 bilhão de metros cúbicos ao ano em 675 plantas.

Das usinas em operação, 78% são de pequeno porte, produzindo cerca de 8% do volume total nacional, este valor é referente principalmente às atividades de agropecuária, plantas descentralizadas. Já o maior volume produzido se dá justamente por plantas de médio e grande porte, concentradas em estações de tratamento de efluentes e resíduos sólidos, que são responsáveis por aproximadamente 73% da produção anual brasileira (CIBIOGÁS, 2021).

Afim de compreender como essa dinâmica é distribuída entre os estados, tem-se a Figura 3-4. Nela, é possível observar que na região Sudeste, em especial no estado de Minas Gerais, encontra-se a maior concentração de plantas, sendo o estado de São Paulo o maior produtor em volume de biogás. Além disso, é possível concluir que a geração de energia elétrica ainda é o destino final mais aplicado, podendo esse gás ser purificado, tornando-se biometano, ou não.

Figura 3-4 - Volume de biogás produzido e aplicação no território nacional.



Fonte: (CIBIOGÁS, 2021)

Apesar do baixo aproveitamento de biogás em relação ao seu potencial, o Brasil já apresenta diversos empreendimentos eficientes para esta fonte de energia. Uma das principais incentivadoras é a PRObiogás, uma parceria entre o setor público brasileiro e a Alemanha (RABELO, 2019).

Um documento produzido por essa iniciativa, cita algumas plantas modelo já em operação: O Aterro Dois Arcos – Ecometano, operando desde 2014 em São Pedro da Aldeia – RJ processa até $1.200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ de biogás, comercializando-o para geração de energia e abastecimento de um caminhão de lixo de futura injeção em gasoduto. A Granja HAACKE, em Santa Helena – PR, a partir de dejetos de aves e bovinos processa 100 m^3 de efluente diariamente, produzindo 1000 m^3 de biogás, convertidos em 112 kVa de energia elétrica, e biometano veicular. Outro exemplo é a ETE Ibitité, coordenada pela COPASA no município de Ibitité – MG, suas 30 toneladas de lodo desidratado por dia produzem 604 kW d^{-1} aproveitados na própria estação.

Estas e outras diversas plantas já em operação são comprovações da boa perspectiva em relação a esse ramo alternativo e sustentável de energia, que apesar dos desafios, deve receber

cada vez mais investimentos, contribuindo de forma mais expressiva à matriz energética do Brasil.

3.8 Estudos da produção de biogás (teórico e prático)

Para que as aplicações de biogás se tornem cada vez mais presentes na cadeia produtiva, é importante consolidar o conhecimento a respeito de todo o ciclo de vida desse gás, a fim de fazer o melhor uso do mesmo. Para definir um projeto de uma planta de aproveitamento, prever sua capacidade e eficiência a fim de determinar os usos, se faz indispensável a determinação da produção e/ou potencial de produção de metano, sendo ele teórico ou prático (PLUGGE, 2017).

Neste contexto, Rosa et al. (2016) avaliaram duas possibilidades de aproveitamento energético do biogás produzido pela ETE Laboreaux em Itabira (MG), que apresentava uma vazão de 78 L s^{-1} e DQO $537,7 \text{ mg L}^{-1}$. A estação era capaz de produzir $0,21 \text{ m}^3$ de biogás por kg de DQO removida, com uma qualidade de 78,2% de metano e 6,7% de CO_2 , que ao ser processado em um motor de combustão interna, gerou até 10.962 MJ d^{-1} de energia ($28,1 \text{ MJ M}^{-3}$ biogás), capaz de atender cerca de 57,6% da demanda total da estação de tratamento.

Já Rachbauer et al. (2017) identificaram os efeitos de variáveis na conversão de carbono para formação de acetato, biogás e composição bacteriana. Os autores concluíram que a acidez prejudica o processo, a pressão de hidrogênio não impactou de forma significativa, e que a concentração de acetato afeta diretamente na eficiência, sendo que para uma metanação hidrogenotrófica, os níveis de acetato devem estar abaixo do $0,8 \text{ g L}^{-1}$, com um taxa de conversão de 75% de metano e uma produção máxima de $0,55 \text{ mmol}$ em 4 dias. Além disso, o gênero predominante no estudo foi o *Methanobacterium*.

Com conclusões similares em relação à limitação promovida pelo acetato, Paez (2019) conduziu testes de Análise Metanogênica Específica (AME) para um dos 6 reatores UASB da ETE UFLA, localizada em Lavras – MG. A estação de tratamento da universidade tratava aproximadamente de $150 \text{ a } 200 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, com uma DQO bastante variável, de média 847 mg L^{-1} . A AME obtida foi de $0,055 \text{ gDQO}_{\text{CH}_4}/\text{gSTV.d}$, valor bem abaixo do normalmente encontrado em efluentes, resultado justificado pelos lançamentos de efluentes químicos com compostos recalcitrantes, além da carência por substrato específico (foi adicionado acetato) da cultura mais abundante, as arqueias hidrogenotróficas (3,89%). Apesar do baixo potencial, a ETE/UFLA teria a capacidade de produzir cerca de $46 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ de metano.

Dando enfoque à determinação de potencial de produção de metano por cálculos teóricos, 3 trabalhos realizados nas cidades do sul Minas Gerais aplicaram a metodologia

descrita por Chernicharo (2007) baseada na carga de DQO removida. Borges, Rangel e Dos Santos (2016) compararam a geração de biogás para uma ETE (vazão de 355,90 L s⁻¹) em relação a um aterro sanitário, ambos em Itajubá – MG. Obteve-se uma produção de biogás empírica de 2038,28 10³ m³ ano⁻¹ e uma potência de 678.65 kW, capacidade cerca de 4 vezes menor que a de um aterro após 5 anos de operação. Silveira Filho et al. (2018) dimensionaram 6 reatores UASB para a ETE de Pouso Alegre, de vazão de 0,33 m³ s⁻¹, estimando uma produção de biogás de 1480 m³ ano⁻¹ e geração de 1,92 GWh ano⁻¹. Já Junior, Lopes (2016) calculou um potencial de 2092,6 m³ d⁻¹, com uma produção energética de 5946,7 kWh d⁻¹ a partir do aproveitamento do biogás de reatores UASB na ETE de Poços de Caldas.

Udaeta et al. (2019) também aplicaram a metodologia definida por Chernicharo (2007), porém para avaliar o potencial de geração de energia elétrica no Estado de São Paulo (SP) a partir do biogás gerado no tratamento de esgoto da ETE Barueri, a maior da América Latina. Seu potencial calculado a partir do método foi de 267,8 Nm³ano⁻¹, podendo gerar 762,8 GW/h, energia suficiente para atender à demanda da ETE, e ainda exportar (165% do consumo médio).

Outro estudo aplicando o cálculo para geração de metano foi conduzido por Bilotta; Ross (2016), porém a partir da metodologia descrita por Lobato (2011). Foi feita uma estimativa de produção de biogás e da emissão evitada pelo biogás da ETE Santa Quitéria, localizada em Curitiba –PR, que realizava um tratamento secundário por seis Reatores Anaeróbios de Leito Fluidizado (RALFs.). Para uma vazão de 33.220,8 m³ d⁻¹ e carga orgânica de 14.617,1 kg d⁻¹ obteve-se uma produção diária de metano de 1.427,2 m³ d⁻¹, capaz de gerar energia correspondente à 59% da demanda da própria ETE, ou seja, 65.280,3 kWh mês⁻¹.

Tratando-se de determinações práticas, Paolini et al. (2018) investigaram a conversão de lodo de esgoto de estações de tratamento de águas residuárias em biometano para combustível automotivo ou injeção em grade. A estação de esgoto selecionada para a pesquisa apresentava uma vazão média de entrada de 54464 m³ d⁻¹, com uma vazão de biogás de 80 m³.h⁻¹ medida por instrumentos volumétricos, sendo que parte dele era submetido à purificação úmida (aplicação de zeólitas) para conversão de biogás para biometano.

No Estado do Colorado – EUA, estudo de Pfluger et al. (2019) teve como objetivo entender a dinâmica e os benefícios do aproveitamento do biogás no estado no Colorado –EUA, além de incentivá-lo. Embora lá a digestão aeróbia seja mais aplicada, há ETE's que utilizam sistemas de DA, aproveitando o biogás principalmente para queima e aquecimento predial. Este estudo trouxe valores diversos para diferentes ETE's, que se diferenciam em vazão e estruturas de tratamento. Por exemplo, em uma estação no Colorado com uma vazão de 113.560 m³.d⁻¹,

há uma produção de $18.350 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ de metano com potência elétrica de 34.200, já uma outra ETE, com vazão de $2650 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, produz $280 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ de metano com potencial de geração de energia elétrica 500 Kwh d^{-1} .

A variedade de estudos comprova a flexibilidade na aplicação do aproveitamento do biogás e a eficiência do mesmo para geração de energia limpa e redução na emissão de gases de efeito estufa. Porém, apesar o biogás já ser reconhecido como prodígio, ainda falta um maior desenvolvimento no setor, aplicando mais tecnologia a fim de torná-lo mais prático e menos custoso.

Uma interessante inovação que pode vir a ser uma saída para a automação parcial no processo de estudo do potencial das ETE's e auxílio na tomada de decisões é a pesquisa realizada por De Clercq et al.(2019), que estruturou um modelo matemático a partir de algoritmos com precisão de até 87% para prever a produção de biogás de duas das maiores usinas de produção de processamento de resíduos sólidos no Sul da China. Uma solução que pode vir a inovar permanente a forma como a energia alternativa é vista, estudada e aplicada.

Afim de compilar as informações mais relevantes coletadas neste tópico e resumi-las de forma mais clara, traz-se a Tabela 3-6.

Tabela 3-6 – Compilação estudos de produção de metano

Fonte	Objetivo	Método de mensuração	Vazão	DQO	% CH ₄	Produção CH ₄	Potencial Energético
(ROSA et al., 2016)	Aproveitamento energético do biogás e lodo de reatores UASB da ETE Itabira	Medido	6.912 m ³ .d ⁻¹	537,7 g m ⁻³	78,20%	305,05 m ³ d ⁻¹	3.069,36 kWh d ⁻¹
(SILVEIRA FILHO et al., 2018)	Dimensionamento de um UASB e recuperação do biogás para geração de energia na ETE de Pouso Alegre - MG	Estimado	30.958,9 m ³ d ⁻¹	715 g m ⁻³	60%	2.432,88 m ³ d ⁻¹	5.260,27 kWh d ⁻¹
(JUNIOR; LOPES, 2016)	Potencial de aproveitamento do biogás em reator UASB no município de Poços de Caldas-MG	Estimado	21.825,8 m ³ d ⁻¹	600 g m ⁻³	75%	2.092,6 m ³ d ⁻¹	5.946,7 kWh d ⁻¹
(UDAETA et al., 2019)	Potencial de geração de energia elétrica no Estado de São Paulo (SP) a partir do biogás do tratamento de esgoto	Estimado	-	-	65%	733.700 m ³ d ⁻¹	2.089.863,01 kWh d ⁻¹
(PAOLINI et al., 2018)	Conversão de lodo de esgoto de ETAR em biometano para combustível automotivo ou injeção em grade	Estimado	54.464 m ³ d ⁻¹	-	-	1.920 m ³ d ⁻¹ (biogás)	-
(BILOTTA; ROSS, 2016)	Energia fornecida pelo biogás gerado em uma ETE, biogás gerado e emissão evitada de gases de efeito estufa (GEEs) com a recuperação do biogás	Estimado	33.220,8 m ³ d ⁻¹	14.617,1 kg.d ⁻¹	65%	1.427,2 m ³ d ⁻¹	2.176,01 kWh d ⁻¹
(PAEZ, 2019)	Potencial máximo de geração de metano em lodo anaeróbio de um reator UASB da ETE-UFLA por meio do ensaio de AME	Estimado	150 a 200 m ³ d ⁻¹	847±652 mg L ⁻¹	-	275,76 m ³ d ⁻¹	-

Fonte: Do autor (2021)

3.9 Sustentabilidade e a UFLA

A partir de 2008, iniciou-se na UFLA um amplo debate a respeito das questões ambientais a serem implementadas e otimizadas pela instituição, a fim de integrá-la de forma mais efetiva às bases da sustentabilidade por meio do incentivo à ciência, buscando, assim, e as novas concepções de que naquela época ainda eram pouco discutidas e traziam inclusive alguns problemas estruturais à instituição, principalmente após a grande expansão da universidade (LADEIRA, 2018).

Com isso, profissionais multidisciplinares reuniram-se para discutir e elaborar o Plano Ambiental Estruturante da UFLA, com o principal objetivo de mover ações para melhoria no funcionamento, combate de passivos já instaurados e prevenção de futuras complicações (LADEIRA, 2018).

Este plano contou com 5 pautas, sendo elas Manejo de Resíduos; Proteção de Nascentes e Matas Ciliares; Saneamento Básico e Estação de Tratamento de Esgoto, Uso da Água e Uso mais Eficiente da Energia. Estas diretrizes deste então contribuíram para a implementação de diversas estruturas e projetos focados na sustentabilidade ambiental, como coleta seletiva em todo o campus, tratamento de água e esgoto próprios, troca das lâmpadas, recuperação de áreas degradadas, dentre muitas outras ações que serviram como grande inspiração à comunidade acadêmica mundial (LADEIRA, 2018).

A repercussão deste Plano Ambiental foi tão grande, que gerou diversas premiações para a UFLA, como o Eco Universidade e o Certificado Blue University, no qual foi a segunda universidade do mundo a recebê-lo, como reconhecimento internacional das práticas sustentáveis implementadas (AQUIAR, 2016).

Desde então, o campus é marcado por diversos avanços e conquistas. No ano de 2020, por exemplo, a UFLA, obteve uma pontuação mais elevada que em 2019 no Greenmetric World University Ranking, classificando a universidade como a segunda mais sustentável do Brasil e da América Latina. Os principais avanços no último ano foram relacionados às métricas de Gestão de Água e Transporte Sustentável, resultados que incentivaram ainda mais os líderes administrativos a investirem em novas soluções relacionadas ao desenvolvimento limpo, como 100% dos veículos movidos à biodiesel, e bicicletas elétricas, com a meta de recuperar o antigo posto como a universidade mais sustentável da América Latina (AVELAR, 2020).

UI Greenmetric World University Ranking é uma iniciativa da Universidade da Indonésia com o objetivo de construir um ranking das universidades com atividades voltadas à

sustentabilidade, de forma a incentivar e reconhecer os líderes e participantes da comunidade universitária ao combate das mudanças climáticas, produção excessiva de resíduos e demais problemas ambientais enfrentados. Atualmente, já avalia 912 instituições em 84 países, crescendo a cada ano. Para a classificação, é aplicada uma detalhada metodologia baseada em 39 indicadores englobados em 6 critérios, sendo eles Ambiente e Infraestrutura, Energia e Mudanças Climáticas, Resíduos, Água, Transporte e Educação (UI Green Metric, 2020)

É certa a grande relevância da Universidade Federal de Lavras em escala global no quesito ambiental, porém, sempre há melhorias a serem feitas e novas tecnologias a serem exploradas. A fim de proporcionar uma boa experiência ao público da UFLA, contribuir para o desenvolvimento da sociedade e aumentar o grau de reconhecimento, trazendo por consequência, um ciclo de mais investimentos e avanços.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visando a determinação do potencial teórico de geração de metano da Estação de Tratamento de Efluentes da UFLA este trabalho produziu uma base de dados a ser comparada com trabalhos já realizados e pesquisas futuras, de modo a aprofundar o conhecimento a respeito da ETE/UFLA e seus potenciais, para que os mesmos sejam cada vez mais explorados.

Em primeiro plano, as informações de monitoramento da ETE/UFLA realizada pela DQMA, mesmo após tratamento estatístico, apresentaram dados pouco representativos, com muitos resultados incoerentes em relação a análises de outros laboratórios e literatura. A partir desta situação, recomenda-se uma definição mais concreta da malha e datas de amostragem, além da padronização das análises e acompanhamento das mesmas por um técnico, também responsável por fornecer treinamentos aos analistas de forma a amenizar as anomalias nos resultados finais. Uma gestão mais próxima deste monitoramento é imprescindível para geração de material para pesquisa e prestação de contas, que serão responsáveis pela manutenção da eficiência do tratamento e melhoramento da estrutura já disponível.

Na busca por dados completos, o compilado de trabalhos já realizados contribuiu para a geração dos resultados expectáveis. A partir destes, considerando a variabilidade natural do sistema de tratamento, o mediano potencial de geração de metano da ETE/UFLA é de $12,62 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, valor menor que o encontrado pelo teste de AME realizado em 2019 na estação por se tratar de uma situação real, em condições não controladas a fim de favorecer a eficiência de geração, como é conduzido nos testes de bancada. Este resultado também justifica a atual dificuldade em coletar e armazenar o biogás produzido na ETE, já que o sistema provavelmente foi dimensionado para maiores vazões.

Se realizado o armazenamento e queima do biogás produzido, a estação poderia tornar-se praticamente autossustentável energeticamente, já que seu potencial de produção de energia elétrica calculado foi de $43,62 \text{ kWh d}^{-1}$, que representa 87% de demanda energética da ETE. A substituição por esta fonte alternativa de energia geraria uma economia de até R\$ 9.202,51 por ano, que poderiam ser reinvestidos em melhorias na própria estação de tratamento de esgoto. Além de que, a UFLA, já mundialmente reconhecida como exemplo em sustentabilidade, se destacaria novamente no quesito inovação ambiental.

Como sugestão para futuros trabalhos, tem-se o estudo de um sistema de coleta de biogás dimensionado para menores vazões, além de estruturas para queima do biogás e consequente geração de energia elétrica ou térmica. O entendimento do custo benefício e eficiência de cada aplicação é fundamental para a escolha da opção ideal. Além disso, o

incentivo à análises mais periódicas tanto dos parâmetros exigidos pela legislação ambiental como vazão de biogás e concentração de metano no mesmo são imprescindíveis para o melhor aproveitamento do potencial da estação, já comprovado por este estudo.

ARTIGO I– ESTUDO DO POTENCIAL TEÓRICO DE PRODUÇÃO DE METANO E POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA UFLA.

RESUMO

Na mesma proporção em que a sociedade se desenvolve, a demanda por energia cresce exponencialmente, ultrapassando inclusive a capacidade de suporte do planeta, trazendo como consequências o agravamento do efeito estufa e graves crises hídricas. Neste contexto, a busca por fontes de energia alternativas torna-se a solução ideal para reduzir os impactos causados pelas atividades humanas. Pautada pelo senso de urgência da necessidade de inovações ambientais, a Universidade Federal de Lavras é referência mundial em sustentabilidade, a qual conta inclusive com sua própria Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), que dispõe do tratamento anaeróbio como um dos mecanismos de remoção de matéria orgânica. Considerando o grande potencial de aproveitamento do biogás, subproduto da digestão anaeróbia, este trabalho teve como objetivo a determinação do potencial teórico de geração de metano e respectivo potencial de geração de energia na ETE/UFLA. O cálculo de gás produzido foi realizado com base na demanda química de oxigênio (DQO) removida durante o tratamento, a partir de dados de entrada e saída do efluente, em monitoramentos conduzidos na estação em uma série histórica de fevereiro de 2017 a maio de 2020. Os resultados determinaram um potencial mediano de geração de CH_4 de $12,62 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, valor que sofreu consideráveis variações durante o período estudado, sendo influenciado principalmente pelas características qualitativas e quantitativas do esgoto, como biodegradabilidade, vazão, tempo de detenção hidráulica, que determinaram a eficiência de remoção de matéria orgânica, e pelo fluxo de pessoas nas dependências da universidade, já que nos períodos de férias houve uma redução na vazão de biogás. Em relação ao potencial de geração elétrica, foi constatado que a ETE/UFLA seria capaz de produzir em média $43,62 \text{ kWh d}^{-1}$, suprimindo cerca de 87% da demanda geral da estação, o que a tornaria praticamente autossuficiente em termos energéticos. A economia gerada com a aplicação desta tecnologia seria de até R\$ 9.202,51 por ano, valor que poderia ser reinvestido em melhorias na estrutura da ETE, e em novas pesquisas, além de contribuir para a redução na emissão de gases tornando-se um exemplo de sistema de tratamento de baixo impacto e alta eficiência.

Palavras-chave: Biogás, Tratamento anaeróbio, Geração distribuída, Bioenergia.

ABSTRACT

As society develops, the demand for energy grows exponentially, surpassing the planet's support capacity, resulting in the aggravation of the greenhouse effect and serious water crises. In this context, the search for alternative energy sources becomes the ideal solution to reduce the impacts caused by human activities. Guided by the urgency sense of the need for environmental innovations, the Federal University of Lavras is a world reference in sustainability, which also has its own wastewater treatment plant (WWTP), which uses anaerobic treatment as one of the mechanisms for removing organic matter. Considering the great potential for biogas reusing, a by-product of anaerobic digestion, this work aims to determine the theoretical methane generation potential and energy generation potential of UFLA's treatment station. The calculation of the produced gas was performed based on the Chemical Oxygen Demand (COD) removed during treatment, from effluent input and output data, in monitoring conducted at the WWTP in a historical series from february of 2017 to march of 2020. The results determined a CH₄ generation potential of 12.62 m³.d⁻¹. This value is underwent considerable variations during the study period, being influenced by the qualitative and quantitative characteristics of the effluent, which attributes determined the efficiency of organic matter removal, and by the flow of people on the university campus, since during vacation periods there was a reduction in the flow of biogas. Regarding the electric generation potential, it was found that the WWTP would be capable to produce an average of 43.62 kWh.d⁻¹, supplying about 87% of it's general demand of the station, which would make it practically self-sufficient in energy terms. The savings generated by the application of this technology would be up to R\$ 9,202.51 per year, an amount that could be reinvested in improvements in the structure of the WWTP, and in new researches, in addition to contributing to the reduction of gas emissions, making it an example of a low-impact, high-efficiency treatment system.

Key words: Biogas. Anaerobic treatment. Distributed generation. Bioenergy.

1 INTRODUÇÃO

A demanda por recursos naturais aumenta de forma proporcional ao desenvolvimento da sociedade, e, diante do crescimento exponencial da mesma, a cada ano, o suporte que o planeta pode oferecer à estas atividades se torna mais limitado, e os impactos causados mais intensos. A fim de conter esse avanço rumo à degradação ambiental, o conceito de geração distribuída vem como uma possível solução. A geração distribuída trata-se da geração de qualquer tipo de energia destinada ao consumo local, sem necessidade de instalação de redes de transmissão, funcionando de forma descentralizada com usinas fotovoltaicas, queima de biogás, biomassa, energia eólica, dentre outras. A ampliação destas fontes renováveis de energia na matriz energética mundial poderá reduzir as emissões de carbono, e até amenizar a crise hídrica já enfrentada atualmente (MENDES; STHEL; LIMA, 2020).

Neste conceito de busca por sustentabilidade ambiental e inovação, a Universidade Federal de Lavras (UFLA) destaca-se. Desde 2016, a partir de seu Plano Ambiental Estrutural, investiu na gestão ambiental e em tecnologias ligadas aos pilares da evolução limpa (LADEIRA, 2018). Estas iniciativas motivaram diversos reconhecimentos mundiais, e em 2020, foi eleita como a segunda universidade mais sustentável da América Latina pelo Greenmetric World University Ranking (AVELAR, 2020).

Nas dependências da UFLA, vale destacar a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), responsável pelo tratamento de grande parte do esgoto produzido em toda a instituição. A ETE conta com um tratamento primário por gradeamento e caixa de gordura, seguida por um tratamento secundário anaeróbico com filtros UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) e uma fase aeróbia em FBAS (Filtro Biológicos Aerados Submerso), direcionando então para caixas de areia e desinfecção por cloração e lâmpadas radiação ultravioleta (UV) (PAEZ, 2019).

Apesar dos avanços em estruturas ambientalmente corretas, a ETE/UFLA ainda não conta com o armazenamento e queima do biogás produzido, que se explorado, seria capaz de gerar potencial para produção de energia elétrica, térmica, equilibrar a pegada de carbono por meio da redução das emissões, estimular economia em receita, e, finalmente, contribuir para diversas pesquisas como um grande laboratório para os programas de graduação e pós graduação.

Com a finalidade de alcançar estes propósitos e aumentar ainda mais visibilidade da universidade no âmbito de fontes alternativas de energia, este trabalho tem como principal objetivo a determinação do potencial teórico de produção de metano da estação de tratamento da UFLA a partir da demanda química de oxigênio (DQO) removida pelo tratamento anaeróbico.

Além disso, traz-se também o potencial de geração de energia a partir da queima desse biogás, com perspectivas de aplicação na própria instituição.

2 METOLOGIA

2.1 Área de estudo

O local definido para estudo no presente trabalho foi a Estação de Tratamento de Efluentes da Universidade Federal de Lavras (ETE/UFLA), localizada no município de Lavras – MG. A estação trata em média 150 a 200 m³ de esgoto proveniente do campus e outras atividades na instituição diariamente, sendo que os rejeitos produzidos em laboratórios e gorduras coletadas do restaurante universitário são tratados separadamente.

O processo de tratamento segue a sequência da chegada do efluente em grades para remoção dos sólidos grosseiros e caixa de gordura na fase preliminar. Em seguida, é direcionado para um tanque equalizador, por onde a vazão é bombeada para 6 reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor*), sendo então direcionadas para 6 FBAS (*Filtro Biológico Aerado Submerso*). O esgoto já submetido ao tratamento biológico é então conduzido para 4 filtros de areia, e finalmente, para desinfecção, passando por cloradores e um canal com radiação UV, sendo por fim lançado em um córrego que corta as dependências da UFLA.

2.2 Coleta e tratamento de dados

Os dados utilizados para aplicação das equações foram adquiridos durante monitoramentos da ETE/UFLA entre 2017 à início de 2020. Este intervalo foi selecionado incluindo desde o início dos acompanhamentos, até o princípio da pandemia, período que foi excluído devido à saída dos alunos e significativa redução da vazão e outras anomalias não representativas da real situação.

A primeira coleta de informações foi realizada no banco de dados de monitoramento da ETE/UFLA disponibilizado pela Diretoria de Gestão da Qualidade e Meio Ambiente (DQMA/Proinfra/UFLA). Com o objetivo de incrementar os resultados e trazer uma base comparativa, foi realizado também um compilado de TCC's e Doutorado defendidos entre os anos de 2017 e 2020 (CAMPOS, 2017; CRIPPA, 2018; FIALHO, 2019; NAHIME, 2019; SANTOS, 2021, 2020).

Tanto os dados da DQMA, quanto o compilado de trabalhos já finalizados foram analisados os resultados de DQO de entrada na ETE, e saída dos reatores UASB, a fim de determinar a DQO removida pelo tratamento anaeróbio. Além disso, foi solicitado dados de vazão, porém, até a finalização deste trabalho, como informado pela DQMA, ainda não havia

um monitoramento da mesma, portanto, a vazão considerada para todos os cálculos foi a média indicada nos relatórios da ETE/UFLA, de $175 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$.

No compilado de trabalhos, existiam mais dados de entrada, portanto, para complementá-los, os dados de saída foram calculados com base na eficiência de remoção de DQO de reatores UASB, referenciada na literatura, considerada como 67,2% (CAMPOS, 2017).

Todas as planilhas fornecidas foram submetidas a um tratamento estatístico, no qual foram eliminados erros e outliers, e calculados os valores de variação interquartil (IQR) (1º, 2º e 3º quartil), máximo, mínimo e média, construindo então gráficos do tipo boxplot para DQO de entrada, DQO de saída, metano e energia produzidos.

2.3 Cálculo da produção de biogás

Para a estimativa do potencial de produção de metano da ETE/UFLA, foi aplicada a metodologia que considera a demanda química de oxigênio degradada nos reatores UASB como referência para os cálculos. As expressões utilizadas e valores referência estão representados a seguir (BORGES;RANGEL; DOS SANTOS, 2016; CHERNICHARO, 2007).

$$Q = \frac{Q_e [S_0 \cdot (1 - Y) - S] \cdot (1 - I)}{f(T) \cdot C} \quad (2-1)$$

Onde:

Q: Vazão de metano a ser coletada na ETE ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$);

Q_e : Vazão da ETE ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$);

S_0 : Concentração de DQO afluente ao reator (kg m^{-3});

S: Concentração de DQO efluente ao reator (kg.m^{-3});

I: Índice de perdas por vazamentos ou por biogás dissolvido no reator (%);

C: Concentração de CH_4 no biogás (%);

Y: rendimento de produção de sólidos ($\text{kgDQOolodo}(\text{kgDQOafluente})^{-1}$);

$f(T)$: fator de correção para a temperatura operacional do reator (kgDQO.m^{-3}) (2-2).

$$f(T) = \frac{P \cdot K_{DQO}}{R \cdot (273 + T)} \quad (2-2)$$

Onde:

P: pressão atmosférica (atm);

- : K_{DQO} : DQO correspondente a um mol de CH_4 ($gDQO.mol^{-1}$);
 R: constante dos gases ($atm.l.mol^{-1}.K^{-1}$);
 T: temperatura operacional do reator ($^{\circ}C$).

2.4 Aproveitamento energético

Para o cálculo do potencial de produção de energia elétrica a partir do biogás produzido pela ETE/UFLA, foi aplicada a metodologia descrita por Udaeta et al (2019).

A queima do biogás como combustível em equipamento geração de energia elétrica é prevista a partir da equação (2-3).

$$E = Q_{\text{biogás}} \times PC_{\text{biogás}} \times \eta_{\text{gerador}} \times 0,000278 \quad (2-3)$$

Onde:

E: potencial de geração de energia (kWh)

$Q_{\text{biogás}}$: vazão de Biogás ($m^3.d^{-1}$)

$PC_{\text{biogás}}$: poder calorífico inferior da combustão do metano ($kJ m^{-3}$)

η_{gerador} : rendimento da tecnologia de geração (%)

0,000278: fator de conversão de $kJ.m^{-3}$ para kWh

Um compilado de todas as informações retiradas das referências bibliográficas consultadas para o cálculo de produção de metano e potencial de geração de energia encontra-se na Tabela 2-1.

Tabela 2-1: Parâmetros utilizados para os cálculos

Parâmetro	Valor	Fonte
I : Índice de perdas por vazamentos ou por biogás dissolvido no reator	40%	(DE SOUZA, 2010)
C : Concentração de CH ₄ no biogás	60%	(BORGES; RANGEL; DOS SANTOS, 2016)
Y : rendimento de produção de sólidos	0,17 kgDQO _{lodo} /kgDQO _{afluente}	(BORGES; RANGEL; DOS SANTOS, 2016)
P : pressão atmosférica	1 atm	(CHERNICHARO, 2007)
K_{DQO} : DQO correspondente a um mol de CH ₄	64 gDQO.mol ⁻¹	(CHERNICHARO, 2007)
R : constante dos gases	0,08206 atm.L.mol ⁻¹ .K ⁻¹	(CHERNICHARO, 2007)
T : temperatura operacional do reator	23°C	Técnico Aroldo ETE/UFLA
PCI_{biogás} : poder calorífico inferior da combustão do metano (biogás para um conteúdo de 99% de metano)	41430,55 KJ.m ⁻³	(ZANK et al., 2020)
η_{gerador} : rendimento da tecnologia de geração	30%	(UDAETA et al., 2019)

Fonte: Do autor.(2021)

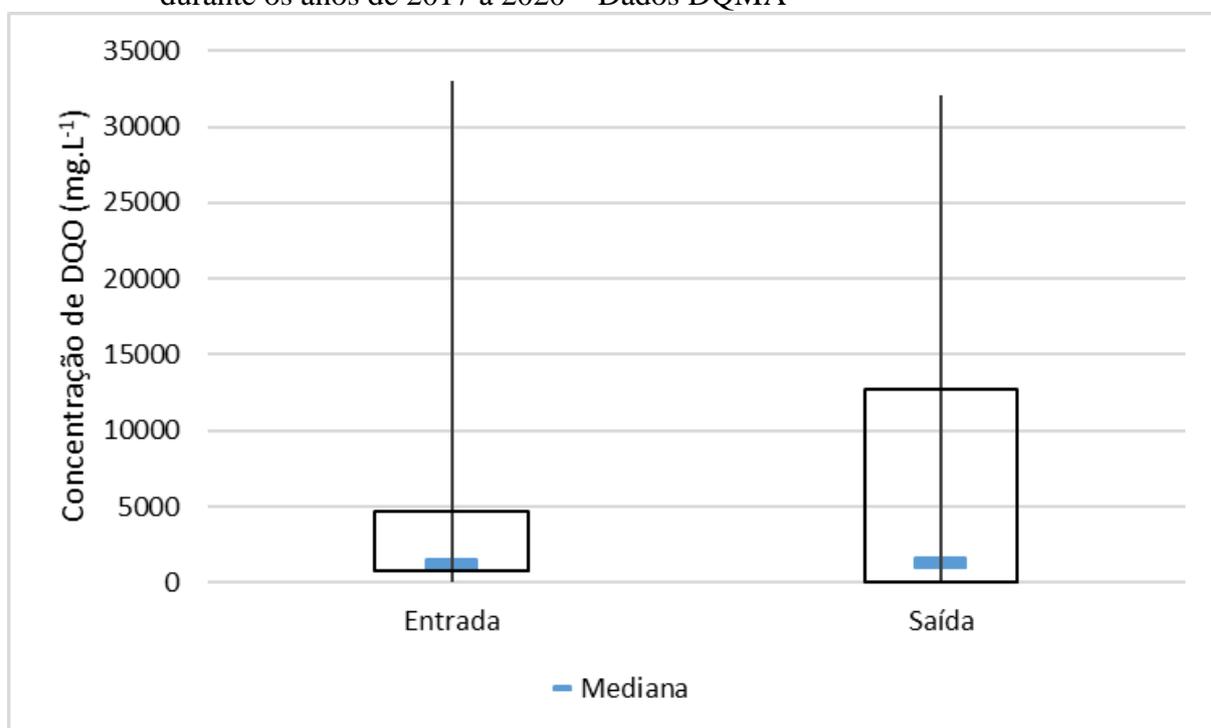
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Monitoramento realizado pela DQMA

3.1.1 Dados de entrada

Os dados fornecidos pelos estudos anteriores e monitoramento da DQMA foram submetidos à uma análise estatística. Como o conjunto de dados de DQO não constituem uma distribuição normal, a média não seria representativa, portanto, construiu-se um gráfico boxplot presente na Figura 3-1 para os dados de entrada e saída da estação.

Figura 3-1: Dados de concentração de DQO (mg L^{-1}) de entrada e saída da ETE/UFLA durante os anos de 2017 à 2020 – Dados DQMA



Fonte: do Autor (2021)

Como demonstrado no gráfico, os dados base para o cálculo de produção de metano apresentaram uma inconstância considerável. A entrada variou de $0,0089 \text{ mg L}^{-1}$, (limite de quantificação) à $33.000,52 \text{ mg L}^{-1}$, com uma mediana de $1164,72 \text{ mg L}^{-1}$.

Os dados de entrada monitorados, indicaram uma variação anormal, com valores de DQO cerca de quarenta vezes maior que a média para esgoto sanitário bruto definida por von Sperling (2014), que alcança entre $450 \text{ e } 800 \text{ g m}^{-3}$, com valores intermediários de 600 g m^{-3} .

Em relação aos dados de saída, grande parte encontrou-se no limite de quantificação, resultado pouco representativo, já que neste caso, a eficiência de remoção seria maior que 95%, afirmação que não procede com outras análises já realizadas na ETE, e com a literatura, que prevê uma remoção de DQO nos reatores UASB de aproximadamente 62% a até 70% (AQUINO; CHERNICHARO, 2005; LETTINGA, 1995; VON SPERLING, 2014).

Além da divergência com dados dispostos na literatura, para alguns deles, a DQO de saída apresentou valores mais elevados que a DQO de entrada, situação que, sugestivamente, pode ter ocorrido devido ao arraste de partículas sólidas em função de elevada velocidade do fluido nos reatores UASB.

Analisando-se as possíveis causas para a grande variação de dados, supõe-se revisão nas etapas metodológicas, uma vez que a diluição pode ter sido superestimada, reduzindo consideravelmente a concentração do efluente, o que pode impossibilitar a identificação pelo método colorimétrico e/ou desajustes na curva padrão de DQO.

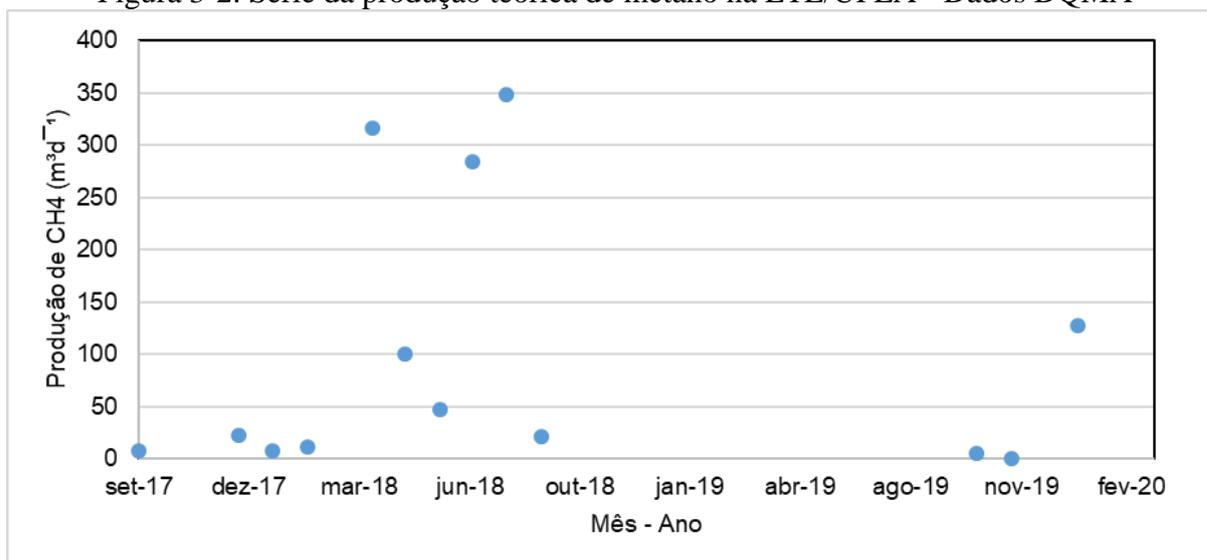
A iniciativa por parte da DQMA em realizar o monitoramento da ETE/UFLA já é um grande diferencial, que coloca à UFLA à frente de outras instituições de ensino, porém, sugere-se que o monitoramento seja realizado de forma constante, tanto na entrada e saída da ETE e realizado por técnicas bem como acompanhado por supervisores, conduzindo-se constantemente treinamentos. Um banco de informações deste tipo é de extrema importância para a instituição, visto que, além do controle da operação e funcionamento da ETE, facilitam a prestação de contas para os órgãos ambientais, funcionam como uma prevenção de futuros problemas, melhor aproveitamento dos potenciais da ETE, e tema para diversos outros trabalhos científicos nessa linha visando a melhoria do tratamento e aplicação de novas tecnologias.

3.1.2 Potencial teórico de produção de metano

Aos dados tratados de DQO removida, aplicou-se o cálculo da produção teórica de metano fim de compará-los com resultados da literatura. A partir do boxplot da Figura 6-1, os dados inconsistentes no qual a saída foi superior à entrada, foram eliminados, juntamente com o dado de entrada *outlier* de 33.000,52 g m⁻³ no mês de março de 2017.

Com a seleção aplicada, foi construído o gráfico retratado na Figura 3-2 da série de dados obtidos, representando a vazão média produzida de metano mensalmente de setembro de 2017 à janeiro de 2020, com alguns intervalos entre os meses em que os resultados foram inconclusivos.

Figura 3-2: Série da produção teórica de metano na ETE/UFLA - Dados DQMA



Fonte: do Autor (2021)

Embora o número de dados tenha sido limitado, o que pode implicar na baixa representatividade da real produção, os anos de 2018 a 2020 apresentaram a maior média, de $142,09 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ e $127,17 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ respectivamente. A mediana geral foi de $22,75 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, com máxima produção de $348,14 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ em agosto de 2018, e mínima de $0,22 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ em novembro de 2019.

3.1.3 Potencial de produção de energia

A partir dos dados teóricos de produção de metano, calculou-se o potencial de produção de energia, visando a queima do biogás produzido para aproveitamento energético limpo. A variação obtida na produção de metano reflete de forma diretamente proporcional à de energia. Quanto maior o poder calorífico do biogás, melhores os resultados na posterior conversão em energia.

Para a série construída, a mediana foi de $78,62 \text{ kWh d}^{-1}$, com um máximo valor de $1202,94 \text{ kWh d}^{-1}$, e mínimo de $0,78 \text{ kWh d}^{-1}$.

3.2 Compilado de trabalhos realizados e/ou publicados referentes à ETE-UFLA

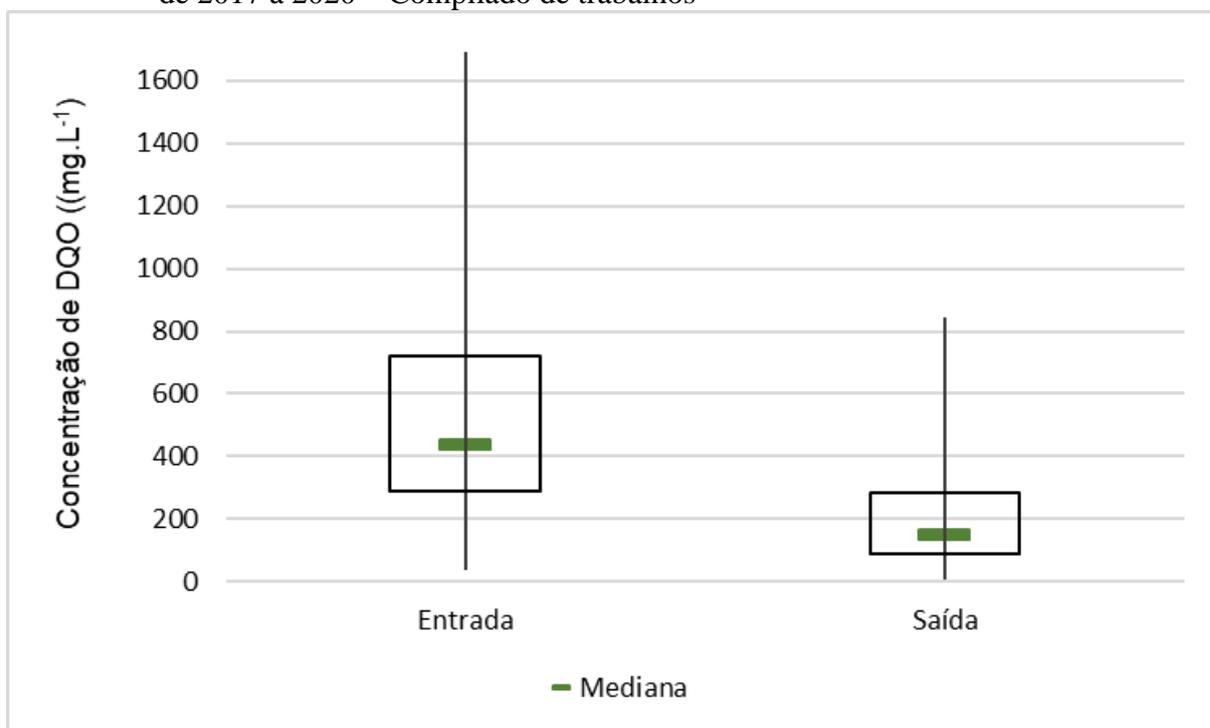
3.2.1 Dados de entrada

Como o monitoramento oficial da ETE/UFLA não gerou resultados com a qualidade esperada, realizou-se então a busca por dados de medição de DQO de entrada e saída *in situ*

realizado em cinco trabalhos de graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da UFLA, e uma doutoranda pelo programa de pós - graduação do mesmo colegiado.

Os 100 dados seguiram o mesmo intervalo de tempo do monitoramento da DQMA, contendo valores dos meses de maio de 2017 a março de 2020. A Figura 3-3 traz o resultado do tratamento estatístico realizado no material adquirido, a partir do qual não foi necessário eliminar inconsistências e/ou *outliers*.

Figura 3-3: Dados de concentração de DQO de entrada e saída da ETE/UFLA durante os anos de 2017 à 2020 – Compilado de trabalhos



Fonte: Do autor (2021)

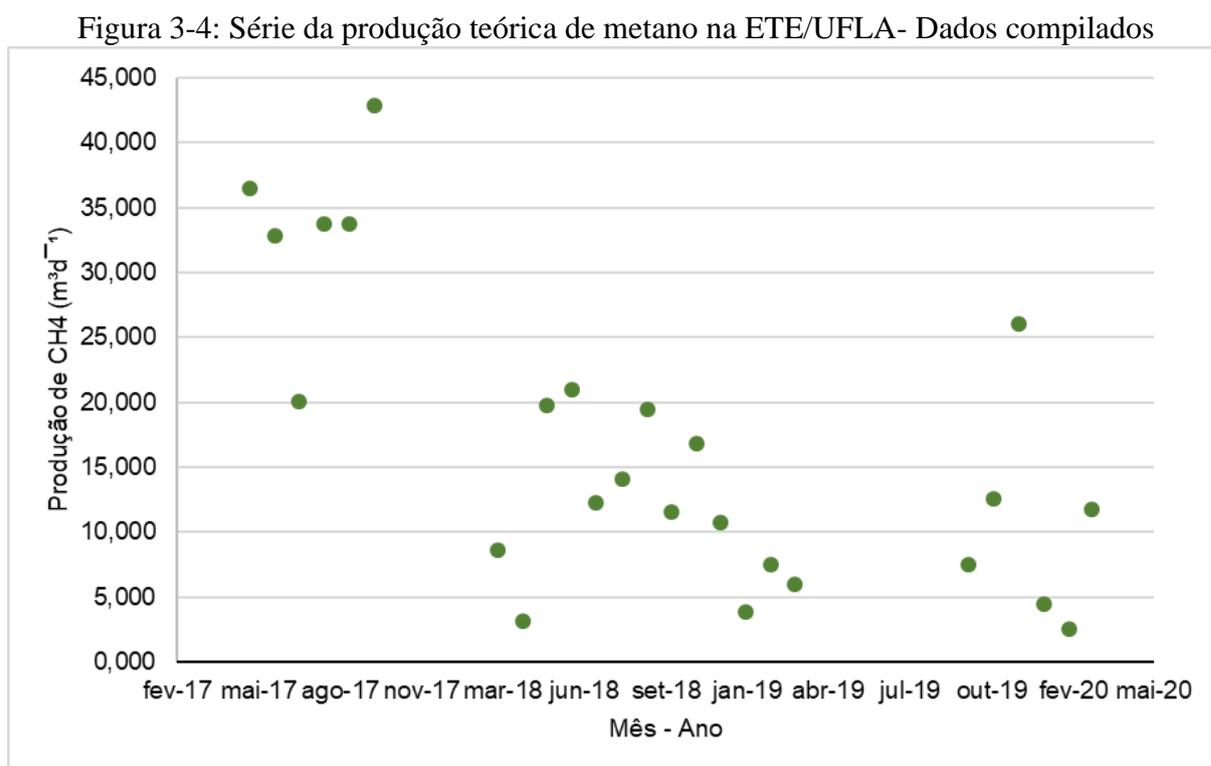
Com estes dados, foi possível observar a variação na concentração de DQO característica da própria estação, já identificada por Paez (2019) e Campos (2017). Estas alterações já são esperadas, já que a ETE recebe efluente de diferentes áreas da universidade, como os pavilhões de aula, restaurante, laboratórios e hospital veterinário que a partir das atividades conduzidas em determinado dia, pode gerar cargas orgânicas diferentes.

Os valores de entrada variaram entre 35,38 mg L⁻¹ à 1.692,20 mg.L⁻¹, com a mediana em 438,26 mg L⁻¹ resultado coerente com a literatura, que encontra-se entre 450 e 800 mg.L⁻¹ segundo von Sperling (2014) . Vale constar também que, neste compilado, os resultados de saída foram sempre menores que os de entrada, com uma eficiência média de remoção de DQO de 67,2%, coerente com o previsto no projeto da Estação de Efluente e por pesquisas já

realizados por Chernicharo (2007) e Seghezzeo et al (1998) com eficiência de 62% e 70% respectivamente.

3.2.2 Potencial teórico de produção de metano

Feita a compilação dos dados de DQO, e tomando como base a vazão média da ETE de $175 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$, foi obtida uma série histórica da produção teórica de metano, exibida pela Figura 3-4.



Fonte: do Autor (2021)

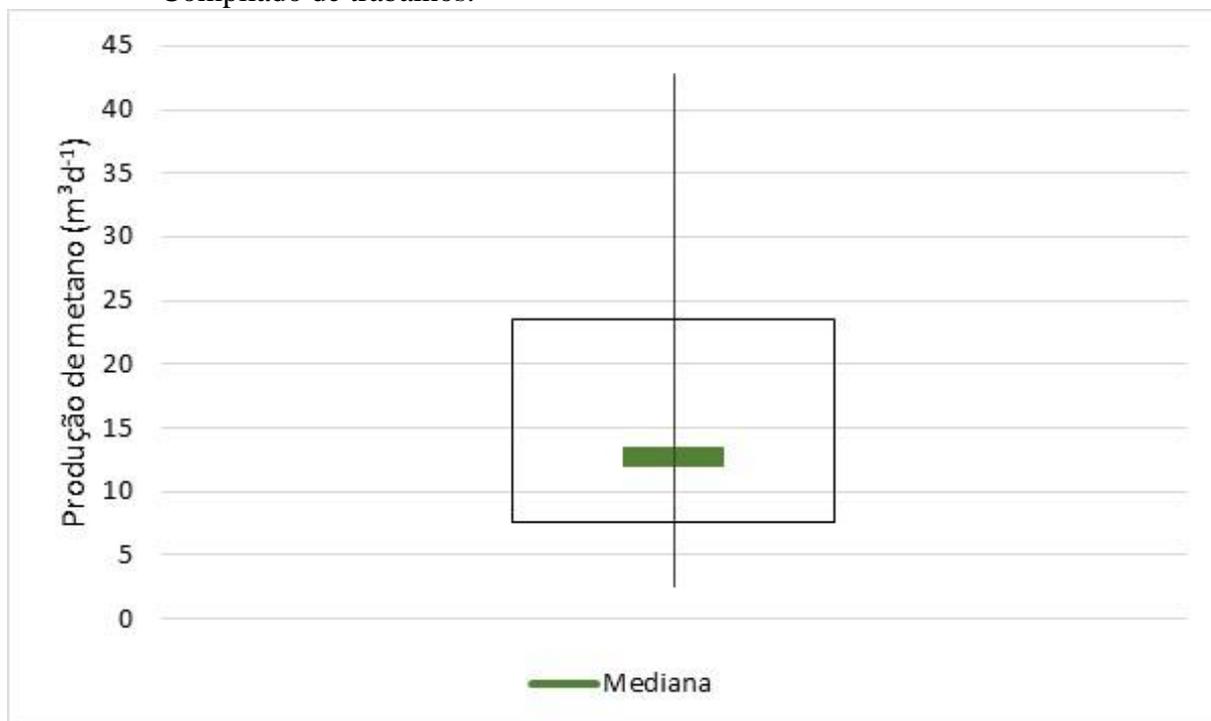
Ao observar o gráfico do potencial teórico de produção de metano da ETE/UFLA ao decorrer do período selecionado, é possível notar que o ano de 2017 pode ter registrado as maiores vazões, valores que provavelmente foram decorrentes da ativação da elevatória que coleta esgoto do hospital veterinário, que ocorreu em abril de 2017. Os altos valores de DQO registrados e consequente produção de metano podem ser consequência do período de adaptação da comunidade acadêmica daquela área da universidade. Tal condição corrobora com as pesquisas de Bosco et al (2015); De Castro et al (2019), do qual comprovaram que resíduos agroindustriais aumentam consideravelmente a DQO de um efluente. No primeiro trabalho, foi caracterizado o esgoto de suinocultura, que apresentou uma demanda química de oxigênio que variou de 1.405 a 4.830 mg L^{-1} . Já na segunda pesquisa citada, foi determinada a DQO de

abatedouro de aves, apresentando um resultado de 3.835 mg L^{-1} . Assim como nessas atividades, o hospital veterinário também produz resíduos como carcaça de animais e sangue, que possivelmente foram direcionados de alguma forma para a Estação de Tratamento de Efluentes. Com o tempo, a gestão desses descartes pode ter sido intensificada, fator que contribuiu para a redução da carga orgânica que chegou à ETE em 2017.

Além disso, analisando as datas é possível relacionar os pontos de dispersão com o período de aulas e férias, identificado também por Nahime (2019). Nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro dos anos de 2018, 2019 e 2020, nota-se uma atenuação da vazão de metano em decorrência do período de férias escolar, no qual o fluxo de pessoas reduz drasticamente, diminuindo também a vazão e carga orgânica que alimentam a ETE.

Um tratamento estatístico também foi realizado para os dados acima, obtendo uma mediana de $12,62 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, com valor máximo de $42,84 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ em outubro de 2017, e valor mínimo de $2,55 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ em fevereiro de 2020. Relações melhor representadas pelo bloxplot da Figura 3-5.

Figura 3-5: Dados da produção teórica de metano ($\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$) durante os anos de 2017 à 2020. - Compilado de trabalhos.



Fonte: do Autor (2021)

Comparada aos resultados obtidos a partir do monitoramento da DQMA, a vazão de metano referente ao compilado de trabalhos é menor, tanto na mediana, e principalmente em

seus valores máximos, que pela DQMA alcançou $348,14 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, oito (8) vezes superior ao máximo calculado a partir desse compilado. Sugere-se que essa diferença seja justificada pela DQO superestimada na primeira análise, que possivelmente não representou a real situação da ETE/UFLA. Além disso, a densidade e qualidade dos dados no segundo tratamento parece ter sido mais representativa.

Um estudo conduzido por Rosa et al (2016), que visou o aproveitamento energético do biogás e lodo de reatores UASB na ETE Itabira – MG, obteve uma produção medida de metano de $305,05 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, a partir de uma vazão de efluente diária de $6.912 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ com DQO $537,7 \text{ g m}^{-3}$. Já Bilotta; Ross (2016) com uma vazão de $33.22,8 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ e DQO $14.617,1 \text{ kd} \cdot \text{d}^{-1}$, obteve uma produção teórica de CH_4 de $1.427,2 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ considerando um biogás com 65% de metano.

Já Silveira Filho et al (2018), a partir de uma vazão de $30.958,9 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, DQO de 715 g m^{-3} e 60% de metano no biogás, estimaram a produção de CH_4 em $2.432,88 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ no UASB dimensionado para a ETE em Pouso Alegre – MG. De forma similar, Junior; Lopes (2016) calcularam uma vazão e metano de $2.092,60 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, a partir de um biogás com 60% de metano, em $21.825,8 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ de efluente com DQO considerada como $600 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ na ETE do município de Poços de Caldas – MG

Houve uma considerável dificuldade em encontrar trabalhos que estimassem a produção de metano em estações de tratamento de menor porte, a maioria das pesquisas publicadas focam no potencial de biometano a partir de resíduos sólidos, que naturalmente possuem uma maior capacidade de produção de biogás. Portanto, ressalta-se a importância em conduzir mais estudos nesta área, de forma a trazer discussões melhor referenciadas.

Paez (2019) conduziu um estudo da atividade metanogênica específica (AME) de um dos reatores UASB da ETE/UFLA. Um dos objetivos foi justamente determinar o potencial de geração de metano da estação, identificar os fatores limitantes da digestão anaeróbia neste ambiente a fim de entender os problemas enfrentados atualmente na operação da ETE, que não realiza captação e queima do biogás. Em seu trabalho, o autor alcançou uma AME inferior às referenciadas na literatura, justificando o resultado a partir da grande variação da composição do efluente, da provável presença de elementos recalcitrantes (metais, DQO não biodegradável, lipídeos, dentre outros) advindos de laboratórios, hospital veterinário e restaurante universitário e da microbiota do UASB estudado.

Apesar dos resultado abaixo do esperado para a autora, a partir da relação da AME e biomassa presente no reator, Paez (2019) presumiu uma produção de metano de $45,96 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ em cada UASB, ou seja, uma produção global de $275,76 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Este valor é aproximadamente

seis (6) vezes maior que o valor máximo de vazão de CH₄ determinada neste trabalho. A disparidade entre os resultados pode ser explicada a partir de alguns pontos. O primeiro deles vem da definição de AME dada por Aquino et al (2007), a qual é a máxima produção de metano, ou seja, a vazão deste gás também é calculada em seu máximo valor, e não em operação regular, como é feito neste trabalho, com dados de campo.

Outra justificativa, é que o experimento de AME é realizado em condições ideais e controladas. A temperatura é ótima, de 30°C, e são adicionados substratos que favorecem a cultura metanogênica em forma de soluções de macro e micronutrientes. No ambiente em que foram coletadas as amostras e na equação aplicada neste trabalho, são consideradas as condições reais, sem qualquer contribuição para a aumentar a eficiência, e à uma temperatura reduzida de 23°C. Estas e outras circunstâncias contribuem para uma vazão de metano menor que a definida em pesquisas de bancada, que mesmo imprescindíveis para o conhecimento do sistema real, por definição já conduzem a um resultado superestimado.

Além dos fatores já discutidos, vale também citar que a produção de metano sofreu consideráveis variações devido à entrada de carga orgânica no sistema e à variabilidade da eficiência de remoção de DQO, que em algumas amostragens, chegou à 29,32%. Como definido por Chernicharo (2007), a produção de metano se dá a partir da degradação da matéria orgânica na digestão anaeróbia, logo, se a remoção for restrita, a vazão de gás também sofre reduções. Esta situação também foi identificada por Paez (2019), que atribui à possíveis elementos recalitrantes no sistema, acúmulo de lipídeos e superdimensionamento da estação. Campos (2017), além destas justificativas, também cita a má distribuição de sólidos dentro do perfil dos reatores UASB, com uma alta concentração de biomassa no fundo, prejudicando a retenção dos microrganismos e conseqüente tratamento do efluente.

Vale citar também que, estes baixos valores de vazão de biogás podem justificar a dificuldade na coleta e armazenamento do mesmo pelos operados da estação atualmente. Esta situação poderia ser solucionada a partir de mais estudos a fim de desenvolver um sistema de captação menor, talvez com diâmetros de tubulação reduzidos, ou coleta pressurizada.

3.2.3 Potencial de produção de energia

Obtido o potencial de produção de metano da ETE/UFLA, foi calculado também o potencial de produção de energia a partir da queima do biogás gerado entre os anos de 2017 à 2020. Seguindo a mesma correlação do potencial de geração de biogás, a mediana em geração

de energia foi de 43,62 kWh d⁻¹., com um valor máximo de 148,02 kWh d⁻¹, e mínimo de 8,81 kWh d⁻¹.

Assim como para a vazão de biogás, os resultados de rendimento energético calculado a partir da base de dados de compilados de trabalhos foi menor que a determinada pelo monitoramento da DQMA, devido a relação direta de proporcionalidade: quanto maior a DQO, maior a geração de energia.

Trabalhos similares, mas tratando-se de estações de tratamento com grandes potenciais de energia, tornam-se coerentes com os resultados obtidos neste trabalho se submetidos à uma proporção relacionada à vazão. A exemplo de Udaeta et al (2019) determinou a capacidade de geração de energia do estado de São Paulo, de 2.089.863,01 kWh d⁻¹, a partir de uma demasiada produção de CH₄ de 733.700 m³ d⁻¹. Já (ROSA et al., 2016), na ETE Itabira em Minas Gerais, estimou um potencial elétrico de 3.069,36 kWh d⁻¹ em uma vazão de efluente de 6.912 m³ d⁻¹ e produção de metano de 305,05 m³ d⁻¹. Com o objetivo similar, Bilotta; Ross (2016), calculou a geração de eletricidade da ETE Santa Quitéria – Curitiba PR como 2.176,01 kWh d⁻¹ a partir de uma vazão de metano de 1.427,2 m³ d⁻¹.

De forma prática, considerando a produção mediana de energia de 43,62 kWh d⁻¹, a queima do biogás produzido seria capaz de suprir 87% da demanda energética de toda a ETE/UFLA, que, determinado por Silva (2021) é de 50,6 kWh d⁻¹, tornando a estação praticamente auto sustentável em termos energéticos. Ainda segundo os cálculos realizados por Silva (2021), o aproveitamento do subproduto gasoso do tratamento poderia trazer uma economia de até R\$ 9.202,51 por ano, tornando possível reinvestir esta verba em melhorias na própria ETE, e em equipamentos e estrutura para monitoramento da mesma.

Um outro comparativo para compreender melhor o potencial produzido pela ETE/UFLA, aplicando como base os dados discutidos em Deganutti et al (2002), é que a energia elétrica passível de ser produzida na estação seria capaz de abastecer duas casas com famílias de cinco pessoas cada, para preparo de alimentos, iluminação, geladeira e banho quente.

É válido ressaltar que, além da queima do biogás para aproveitamento energético, uma boa aplicação subproduto gasoso da digestão anaeróbia da ETE/UFLA seria a conversão em energia térmica, aplicada na secagem do lodo retirado dos UASB, reduzindo o volume e esterilizando-o, simplificando a posterior destinação final (BRESSANI-RIBEIRO et al., 2019).

4 CONCLUSÃO

Visando a determinação do potencial teórico de geração de metano da Estação de Tratamento de Efluentes da UFLA, este trabalho produziu uma base de dados a ser comparada com trabalhos já realizados e pesquisas futuras, de modo a aprofundar o conhecimento a respeito da ETE/UFLA e seus potenciais, para que os mesmos sejam cada vez mais explorados.

Em primeiro plano, as informações de monitoramento da ETE/UFLA realizada pela DQMA, mesmo após tratamento estatístico, apresentaram dados pouco representativos, com muitos resultados incoerentes em relação a análises de outros laboratórios e literatura. A partir desta situação, recomenda-se uma definição mais concreta da malha e datas de amostragem, além da padronização das análises e acompanhamento das mesmas por um técnico, também responsável por fornecer treinamentos aos analistas de forma a amenizar as anomalias nos resultados finais. Uma gestão mais próxima deste monitoramento qualitativo (parâmetros de qualidade) e quantitativo (vazão) é imprescindível para geração de material para pesquisa e prestação de contas, que serão responsáveis pela manutenção da eficiência do tratamento e melhoramento da estrutura já disponível.

Na busca por dados complementares, o compilado de trabalhos já realizados contribuiu para a geração dos resultados expectáveis. A partir destes, considerando a variabilidade natural do sistema de tratamento, o mediano potencial de geração de metano da ETE/UFLA é de $12,62 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$.

Se realizado o armazenamento e queima do biogás produzido, a estação poderia tornar-se praticamente autossustentável energeticamente, já que seu potencial de produção de energia elétrica calculado foi de $43,62 \text{ kWh.d}^{-1}$, que representa 87% de demanda energética da ETE. A substituição por esta fonte alternativa de energia geraria uma economia de até R\$ 9.202,51 por ano, que poderiam ser reinvestidos em melhorias na própria estação de tratamento de esgoto. Além de que, a UFLA, já mundialmente reconhecida como exemplo em sustentabilidade, se destacaria novamente no quesito inovação ambiental.

Como sugestão para futuros trabalhos, tem-se o estudo de um sistema de coleta de biogás dimensionado para menores vazões, além de estruturas para queima do biogás para geração de energia elétrica ou térmica. O entendimento do custo benefício e eficiência de cada aplicação é fundamental para a escolha da opção ideal. Além disso, o incentivo às análises mais periódicas tanto dos parâmetros exigidos pela legislação ambiental como vazão de biogás e concentração de metano no mesmo são imprescindíveis para o melhor aproveitamento do potencial da estação, já comprovado por este estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Atlas Esgotos: Atualização Da Base De Dados De Estações De Tratamento De Esgotos No Brasil. **Agência Nacional de Águas**, p. 47, 2020.

AQUIAR, C. **UFLA é azul: 2ª Universidade do mundo com o certificado Blue University em reconhecimento pela Gestão das Águas**. Disponível em: <<https://www.ufla.br/dcom/2016/05/16/ufla-e-azul-2a-universidade-do-mundo-com-o-certificado-blue-university-em-reconhecimento-pela-gestao-das-aguas/>>. Acesso em: 12 set. 2021.

AQUINO, S. F. DE; CHERNICHARO, C. A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 152–161, 2005.

AQUINO, S. F. et al. Methodologies for determining the specific methanogenic activity (SMA) in anaerobic sludges. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 192–201, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS - ABIOGÁS. O Potencial Brasileiro de Biogás. 2020.

AVELAR, S. **Ranking GreenMetric: UFLA entre as 30 universidades mais sustentáveis do mundo**. Disponível em: <<https://ufla.br/noticias/institucional/14160-ranking-greenmetric-ufla-entre-as-30-universidades-mais-sustentaveis-do-mundo>>. Acesso em: 12 set. 2021.

AVELLAR, L. H. N. **A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental**. [s.l.] UNESP Guaratinguetá, 2001.

BILOTTA, P.; ROSS, B. Z. L. Estimate of energy generation and of greenhouse gas emission on biogas recovery from wastewater treatment plant. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 275–282, 2016.

BORGES, P. B.; RANGEL, M. S.; DOS SANTOS, I. F. S. Análise comparativa e avaliação do potencial de produção de biogás na ETE e aterro sanitário de Itajubá (MG). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 3, p. 278–292, 2016.

BOSCO, T. C. D. et al. Caracterização de águas residuárias de suinocultura provenientes de dois sistemas de tratamento. **Revista Agrogeoambiental**, v. 8, n. 3, p. 111–120, 2015.

BRESSANI-RIBEIRO, T. et al. Planning for achieving low carbon and integrated resources recovery from sewage treatment plants in Minas Gerais, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 242, n. May, p. 465–473, 2019.

BUDZIANOWSKI, W. M.; WYLOCK, C. E.; MARCINIAK, P. A. Power requirements of biogas upgrading by water scrubbing and biomethane compression: Comparative analysis of various plant configurations. **Energy Conversion and Management**, v. 141, p. 2–19, 2017.

CAMPOS, L. B. **Estimativa da produção de metano de um reator UASB**. [s.l.] Universidade Federal de Lavras, 2017.

CÁRDENAS, L. M. et al. Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos Perspectives of Biochemical Methane Potential - BMP test for control the anaerobic digestion process of wastes Perspectivas do t. **Revista ION**, v. 29, n. 1, p. 95–108, 2016.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Vol. 5 – Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte : UFMG: [s.n.].

CHOONG, Y. Y.; CHOU, K. W.; NORLI, I. Strategies for improving biogas production of palm oil mill effluent (POME) anaerobic digestion: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. November 2017, p. 2993–3006, 2018.

CIBIOGÁS. Panorama Biogás no Brasil 2020. **DOC On-line**, v. 1, n. 1, 2021.

CRIPPA, R. A. **Avaliação da capacidade de remoção de poluentes pelas espécies *Zantedeschia aethiopica* E *Typha domingensis* em sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subperifical no tratamento do efluente da Universidade Federal de Lavras**. [s.l.] Universidade Federal de Lavras, 2018.

DE CASTRO, R. DE P. V. et al. Physico-chemical and enzymatic pre-treatment for wastewater from slaughterhouse. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 5, p. 975–981, 2019.

DE CLERCQ, D. et al. Machine learning powered software for accurate prediction of biogas production: A case study on industrial-scale Chinese production data. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 390–399, 2019.

DE SOUZA, C. L. Estudo Das Rotas De Formação , Transporte E Consumo Dos Gases Metano E Sulfeto De Hidrogênio. p. 147 p, 2010.

DEGANUTTI, R. et al. **Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada**. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL. **Anais...**Campinas-SP: 2002

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, E. Atlas da Eficiência Energética-Brasil | 2020. p. 102, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, E. Balanço Energético Nacional. 2021.

FEROLDI, M. et al. Armazenamento de metano à pressão reduzida em carvão ativado sob diferentes condições de temperatura e vazão de carga. **Revista Materia**, v. 22, 2017.

FIALHO, D. E. S. Caracterização do esgoto sanitário e avaliação da eficiência da ETE/UFLA na remoção de fármacos e desreguladores endócrinos. p. 100, 2019.

FUCHS, G., THAUER, R., ZIEGLER, H. ET AL. Carbon isotope fractionation by *Methanobacterium thermoautotrophicum*. **Arch. Microbiol** ,**120**, p. 135–139, 1979.

JACOBOWSKI, M. Viabilidade Econômica Da Cogeração De Energia Elétrica Do Biogás: Um Estudo De Caso No Aterro Sanitário De Toledo, Paraná. 2018.

JUNIOR, P.; LOPES, M. Aproveitamento energético de biogás produzido pelo tratamento de efluentes lúquidos urbanos utilizando reatores UASB : um estudo de caso para Poços de Caldas - MG. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, p. 204–221, 2016.

LADEIRA, M. M. Criação de uma Universidade Verde - O Plano Ambiental e Estruturante da UFLA. p. 1–9, 2018.

LECKER, B. et al. Biological hydrogen methanation – A review. **Bioresource Technology**, v. 245, n. September, p. 1220–1228, 2017.

LEE, D. H. et al. Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: A lab-scale study. **Waste Management**, v. 29, n. 2, p. 876–882, 2009.

LETTINGA, G. Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. **Antonie Van**

Leeuwenhoek, v. 67, p. 3–28, 1995.

LEVÉN, L.; ERIKSSON, A. R. B.; SCHNÜRER, A. Effect of process temperature on bacterial and archaeal communities in two methanogenic bioreactors treating organic household waste. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 59, n. 3, p. 683–693, 2007.

LOBATO, L. D. S. Aproveitamento Energético De Biogás Gerado Em Reatores Uasb Tratando Esgoto Doméstico. **Smarh.Eng.Ufmg.Br**, p. 184, 2011.

MCCARTY, P. L.; SMITH, D. P. Anaerobic wastewater treatment. **Environmental Science and Technology**, v. 20, n. 12, p. 1200–1206, 1986.

MENDES, L. F. R.; STHEL, M. S.; LIMA, M. A. O crescimento da geração distribuída no contexto da crise hidroenergética na região Sudeste do Brasil: aspectos ambientais e socioeconômicos. **Revista Vértices**, v. 22, n. 3, p. 626–647, 2020.

NAHIME, T. **Avaliação do potencial de produção de metano de um reator UASB em escala experimental alimentado com esgoto sanitário da UFLA**. [s.l.] Universidade Federal de Lavras, 2019.

PAEZ, S. **Estudo da Atividade Metanogênica Específica e microbiota de lodo proveniente de um reator UASB instalado na ETE-UFLA tratando esgoto sanitário**. [s.l.] Universidade Federal de Lavras, 2019.

PAOLINI, V. et al. Characterisation and cleaning of biogas from sewage sludge for biomethane production. **Journal of Environmental Management**, v. 217, p. 288–296, 2018.

PAVLOSTATHIS, S. G.; GIRALDO-GOMEZ, E. Kinetics of anaerobic treatment: a critical review. In: **Critical Review in Environmental Control**. [s.l.: s.n.]. p. 411–490.

PFLUGER, A. 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, C. M. Biogas. **Microbial Biotechnology**, v. 10, n. 5, p. 1128–1130, 2017.

RABELO, C. A. O fomento do biogás como fonte de energia renovável. **Revista Videre**, v. 11, n. 22, p. 79–91, 2019.

RACHBAUER, L. et al. Characteristics of adapted hydrogenotrophic community during biomethanation. **Science of the Total Environment**, v. 595, p. 912–919, 2017.

ROSA, A. P. 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 Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 315–328, 2016.

SALÉH, B. B.; CAMPOS, C. M. M.; FIGUEIREDO, J. G. DE. Levantamento de parâmetros cinéticos medidos em reator anaeróbico de manta de lodo (UASB) em escala-piloto tratando efluentes de laticínio. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 31, n. 1, 2009.

SANTOS, J. **Sistemas alagados construídos do tipo Bio-Rack como tratamento simplificado de esgoto sanitário para soluções individuais**. [s.l.] Universidade Federal de Lavras, 2021.

SANTOS, M. **Efeito do nível de esgoto no desenvolvimento do sistema radicular e na absorção de nutrientes em sistemas alagados construídos**. [s.l.] Universidade Federal de Lavras, 2020.

SEGHEZZO, L. et al. A review: The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB

reactors. **Bioresource Technology**, v. 65, n. 3, p. 175–190, 1998.

SILVA, C. **Estudo dos custos operacionais da Estação de Tratamento de Esgoto da Universidade Federal de Lavras**. [s.l.] Universidade Federal de Lavras, 2021.

SILVEIRA FILHO, A. S. L. et al. Dimensionamento De Um Reator Uasb Para Tratamento De Efluentes Domesticos E Recuperação Do Biogás Para Produção Energética: Um Estudo De Caso Em Pouso Alegre (Mg). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 7, n. 1, 2018.

UDAETA, M. E. M. et al. Basic and procedural requirements for energy potential from biogas of sewage treatment plants. **Journal of Environmental Management**, v. 236, n. December 2018, p. 380–387, 2019.

UI Green Metric. Disponível em: <<https://greenmetric.ui.ac.id/about/methodology>>. Acesso em: 12 set. 2021.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4^a ed. Belo Horizonte: [s.n.].

WANG, P. et al. Microbial characteristics in anaerobic digestion process of food waste for methane production—A review. **Bioresource Technology**, v. 248, p. 29–36, 2018.

WISE, D.L., COONEY, C.L., AUGENSTEIN, D. C. Biomethanation: anaerobic fermentation of carbon dioxide, hydrogen, and carbon monoxide to methane. **Biotechnol. Bioeng.**, v. 20, p. 1153–1172, 1978.

ZACHOW, C. R. **Biogás**. DeTEC – De ed. [s.l: s.n.].

ZANK, J. C. C. et al. The characteristics of biogas and evaluation of fuel substitution. v. 18, n. 3, p. 502–516, 2020.