UNIDADE DE ENSINO SUPERIOR DE FEIRA DE SANTANA

IKARO ALVES SOARES

ANÁLISE COMPARATIVA DE EQUAÇÕES PARA OTIMIZAR O MODELO DE MONOD EM BIODIGESTORES

Feira de Santana

2021

Ikaro Alves Soares

ANÁLISE COMPARATIVA DE EQUAÇÕES PARA OTIMIZAR O MODELO DE MONOD EM BIODIGESTORES

Trabalho de Conclusão de Curso da faculdade UNEF - Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana como requisito para obtenção do título em Bacharelado em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Ma. Vanessa Gomes Matos

Feira de Santana

2021

IKARO ALVES SOARES

ANÁLISE COMPARATIVA DE EQUAÇÕES PARA OTIMIZAR O MODELO DE MONOD EM BIODIGESTORES

Feira de Santana, 21/setembro/2021

Banca Examinadora:

_____

Profa. Ma. Vanessa Gomes Matos

Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana

Orientadora

_____

Prof. Fernanda Mansani

Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana

Examinador

_____

Prof. Ricardo Mota

Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana

Examinador

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser presente em minha vida, meu guia, e minha força para seguir, a minha avó Marinalva e aos meus familiares.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, graças a Deus, ele garantiu que eu atingisse meus objetivos durante meus anos de estudo. Gostaria de agradecer a minha avó Marinalva, meu pai Josué e minha mãe Nivia, pelo apoio e ajuda que deram até aqui para contribuir para a realização deste trabalho.

Agradeço aos professores, e em especial a minha orientadora Profa. Ma. Vanessa Gomes Matos e Profa. Fernanda Mansani, pelas correções e orientações, que me ajudaram a ter um melhor desempenho no processo de formação profissional de todo o curso.

Quero agradecer aos meus colegas que têm convivido de perto nos últimos anos, e agradeço a companhia e a troca de experiências, permitindo-me crescer não só como pessoa, mas também como profissional.

Agradeço também a Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana, ela foi fundamental no meu processo de formação profissional, dedicação e tudo o que aprendi no curso.

“Não podemos prever o futuro, mas
podemos criá-lo. ”

Peter Drucker, 1977

RESUMO

A biodegradação anaeróbica é um processo em que resíduos orgânicos, de qualquer origem, são convertidos em fertilizantes e biogás. Biogás, um gás composto por metano e dióxido de carbono, pode ser utilizado para aquecimento e geração de eletricidade. Os reatores anaeróbicos são uma alternativa viável para utilizar resíduos orgânicos produzidos em estações de tratamento industriais e domésticos, todavia, a biodigestão não é amplamente utilizada no Brasil. A literatura mostra que a baixa adesão acontece pela falta de trabalho especializado, além de escassez de metodologias para orientar os produtores agrícolas, falta de apoio e de tecnologias mais acessíveis, assim o processo se torna extremamente complexo, controlado por variáveis pouco claras, deixando de lado as oportunidades de melhoria do processo por falta de um modelo que simplifique seu uso. Com o avanço da tecnologia os sistemas de simulação e análises foram melhorados e hoje podemos ter resultados mais próximos da realidade, assim como os biodigestores, que com o passar dos anos foram se modificando e evoluindo para conseguir melhorar o tempo de retenção e aumentar a sua produtividade, e hoje são utilizados em vários campos de trabalho e pesquisa. Foi feita uma comparação entre as equações e se o foco de trabalho for o substrato é adequada as equações propostas por Zaiti (2003), mas se a proposta de trabalho for focada no microrganismo pode-se mesclar ambos os autores, pois tratam sobre esse assunto em todas as equações. Este trabalho tem como objetivo trazer um estudo comparativo de equações para otimizar o modelo matemático de Monod para biodigestores, apresentando suas peculiaridades, adaptações e nível de complexidade para prática computacional. Os resultados oriundos dessa pesquisa possibilitarão a área acadêmica um resumo dos variados tipos de biorreatores disponíveis no mundo, além de melhorar a confiança para escolha de um modelo matemático adequado para o processo de acordo com o grau de variáveis trabalhadas, realizando comparativos para melhorias nas equações e os seus ajustes para o funcionamento do modelo escolhido.

Palavras-chave: Biodigestor, Biogás, Modelo matemático

ABSTRACT

Anaerobic biodegradation is a process in which organic waste, from any source, is converted into fertilizers and biogas. Biogas, a gas composed of methane and carbon dioxide, can be used for heating and electricity generation. Anaerobic reactors are a viable alternative to use organic waste produced in industrial and domestic treatment plants, however, biodigestion is not widely used in Brazil. The literature shows that low adherence happens due to the lack of specialized work, in addition to the lack of methodologies to guide agricultural producers, lack of support and more accessible technologies, so the process becomes extremely complex, controlled by unclear variables, leaving no side the opportunities for process improvement due to the lack of a model that simplifies its use. With the advancement of technology, simulation and analysis systems have been improved and today we can have results closer to reality, as well as the biodigesters, which over the years have been modified and evolved in order to improve retention time and increase its productivity, and today they are used in various fields of work and research. A comparison was made between the equations and if the work focus is the substrate, the equations proposed by Zaiti (2003) are adequate, but if the work proposal is focused on the microorganism, both authors can be merged, as they deal with this subject in all equations. This work aims to bring a comparative study of equations to optimize the Monod mathematical model for biodigesters, presenting its peculiarities, adaptations and level of complexity for computational practice. The results from this research will enable the academic area to summarize the various types of bioreactors available in the world, in addition to improving confidence in choosing an appropriate mathematical model for the process according to the degree of worked variables, making comparisons for improvements in the equations and its adjustments for the functioning of the chosen model.

Keywords: Biodigestor. Biogas. Mathematical model

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Reator UASB. 14

Figura 02 – Biodigestor Idiano. 15

Figura 03 – Biodigestor Chinês. 16

Figura 04 – Reator de Contato. 17

Figura 05 – Reator de Leito Híbrido. 18

Figura 06 – Digestor proposto. 21

Figura 07 – Trajeto ETE. 22

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1	Biodigestor	17
3.1.1	Modelos de Biodigestores	18
3.1.2	Projeto do Biodigestor	21
3.2	Modelos Matemáticos	22
3.2.1	Modelo de Monod	23
3.2.2	Modelo de Saturação pela Célula	24
3.2.3	Modelo de Contois	26
4	METODOLOGIA	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
6	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

Com a chegada da Revolução Industrial no mundo houve um grande aumento do consumo da demanda energética, uma vez que ela trouxe consigo o período da industrialização, e para suprir esse fornecimento de energia foram utilizadas diversas fontes geradoras, sem levar em consideração o impacto que elas poderiam causar para as pessoas e ao meio ambiente. Todavia, atualmente é perceptível uma preocupação cada vez maior com o desenvolvimento sustentável, sendo assim o sistema de biodigestão pode ser uma alternativa viável para essa problemática, tanto em escala doméstica quanto industrial (SILVA, 2012).

A ideia da sustentabilidade tomou força em todo mundo ao pregar que as nações devem priorizar o uso de fontes de energia que sejam de baixo custo e que tenham o menor impacto ambiental, e aqueles países que possuem fontes de energia exclusivamente não renováveis devem rever a sua matriz energética. Sendo assim, o investimento em produção de biocombustíveis foi impulsionado, por ele ser eficiente e renovável (SILVA, 2012).

Além disso, podemos destacar que a geração de lixo é um dos problemas que mais afetam a sociedade atual, sendo que há diversas alternativas em pequena e grande escala para minimizar essa problemática, como por exemplo a incineração, compostagem e aterros. E na maioria das cidades a última opção é a mais utilizada devido ao orçamento apertado, mesmo sabendo que esta é uma solução provisória uma vez que no final do seu uso há um problema a se tratar (ANDRADE, 2015).

Quando se pensa em geração de resíduos em escala industrial a problemática é ainda maior, os efluentes gerados no processo de produção, principalmente no ramo alimentício, possui grandes teores de material orgânico, gorduras, sólidos em suspensão e nutrientes, que podem acarretar problemas futuros no seu tratamento e descarte. Isso ocorre devido a elevada produção de escuma, pequena sedimentação do lodo, dificuldade de remover os nutrientes, gorduras, óleos e corantes (SILVA *et a*l, 2012).

Nos últimos anos as indústrias vêm passando por um momento bastante delicado, foram alteradas algumas legislações ambientais e o fato de que a oferta de água, com qualidade, e de energia, para consumo e tratamentos convencionais, utilizados nas estações de tratamento de efluentes, diminui cada dia mais, além do que há

necessidade de descarte correto para o efluente tratado. Sendo assim, o reuso de efluentes está se tornando algo comum e uma opção ambiental e de baixo custo para as indústrias (SILVA *et al*, 2012).

Ao utilizar os efluentes, a indústria, melhora a visão ambiental da população sobre ela, além de gerar um aumento nos lucros, a partir da redução de custos com o descarte do material gerado, ou com a geração de energia e a sua utilização em média ou pequena escala, a depender da sua produção de resíduos. Em países desenvolvidos isso já uma realidade, porém no Brasil ainda existem problemas quanto ao reuso de efluentes, devido a carência de alternativas de tratamento de efluentes, falta de tecnologias e até mesmo de não conhecimento dessa possibilidade, já que isso não é muito difundido (ANDRADE, 2015).

Como alternativa para esse cenário temos o biodigestor, que contribui para a redução da poluição ambiental, além de trazer benefícios para quem o utiliza, pois na biodigestão é produzido o gás metano, excelente combustível, e os resíduos de material orgânico podem ser utilizados como adubo para o setor agrícola. Existem vários estudos utilizando biodigestores, principalmente no tratamento de efluentes, uma vez que eles podem melhorar a qualidade do solo, contribuindo para a manutenção do setor produtivo, e produzem combustível para geração de energia, contribuindo com a geração de energias renováveis (SILVA *et al*, 2012).

Um biorreator ou biodigestor é formado, basicamente, por um tanque de fermentação anaeróbico com material orgânico que geram o biogás, que é um combustível formado por metano, e podem ser utilizados diversos tipos de material orgânico que é conhecido como biomassa, como por exemplo, lixo orgânico, fezes de animais, resíduos e efluentes industriais (POLL, 2018).

Na fermentação da biomassa, é onde ocorre a produção do biogás, visto que ele é o resultado da fermentação, sem a presença de oxigênio, de matérias orgânicas, submetidas a condições apropriadas de umidade, esse processo é denominado digestão anaeróbica e é feito em duas etapas: primeiro as moléculas orgânicas são convertidas em ácidos graxos, gás ou sais; em seguida eles são transformados em um gás que é composto por dióxido de carbono e metano (FRANTZ; SILVA, 2020).

A interação de diversos componentes de um processo está conectada por um conjunto de variáveis que podem ser descritos, as regras e modos de como eles são calculados varia de acordo com o tempo, para que um computador possa realizar uma

simulação de um modelo ele precisa conhecer as regras e equações para guardar e calcular os valores, e nem sempre é necessário calcular todas as variações, de acordo com a aplicação que será feita (FRANTZ; SILVA, 2020).

Devido a essa problemática esta pesquisa quer apresentar tipos de biodigestores, e demonstrar um estudo comparativo de equações de autores diferentes que tomam como base o processo de conversão de biomassa em biogás utilizando o modelo de Monod, além de apresentar a suas características e adaptações para o seu uso.

2 OBJETIVOS

Objetivo Geral

Analisar comparativamente equações para otimização do modelo de Monod em biodigestores.

Objetivos Específicos

- Descrever modelos matemáticos para biodigestores;
- Descrever as características especificas das adaptações do modelo de Monod para aplicação em biodigestores;
- Avaliar o impacto da utilização de análises do crescimento microbiológico e consumo de substrato para otimização do modelo de Monod.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Biodigestor

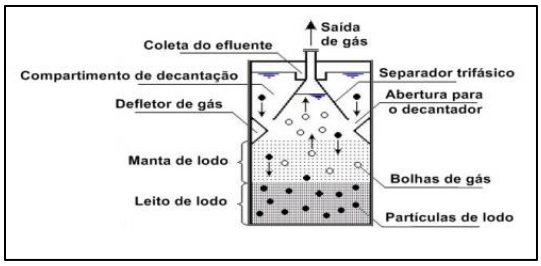
Biodigestor é o equipamento usado para processar material orgânico também, pode ser chamado de biomassa. É feito de um ou mais do recipiente em que resíduos são depositados e passam por um processo de fermentação anaeróbica que resulta em biogás e fertilizantes (CARNEIRO, 2019).

O primeiro biodigestor foi construído em 1857 em Bombaim, Índia. Foi feito na intenção de produzir gás combustível para um hospital, o que faz da biodigestão uma tecnologia de mais de 100 anos atrás. Mesmo com a presença imponente de energia fóssil que prevaleceu até a primeira crise do petróleo em 1970, apenas os biodigestores estavam no mundo como alternativa já desenvolvida e aplicada em larga escala na Índia e na China (GASPAR, 2003).

Na primeira crise do petróleo, a biodigestão tornou-se outra opção, principalmente para produção de energia viável, outra razão para isso foi o aumento do interesse pela digestão biológica como alternativa para um problema de saúde. Na década de 1970, a maioria dos processos biológicos de tratamento de águas residuais eram aeróbicos, ou seja, era usado oxigênio para degradar matéria orgânica (SARAVANAN SREEKRISHNAN, 2006).

Biodigestores foram usados apenas como um processo em estações de tratamento secundário, porém no início da década de 1970, foi proposto o biodigestor UASB (upflow anaerobic sludge blanket), conforme mostra a Figura 01, onde o tempo de retenção é semelhante ao de um reator aeróbico, e foi por esse motivo que os profissionais de saúde se interessaram nesse processo (LETTINGA *et al*, 1980).

Figura 1 - Reator UASB



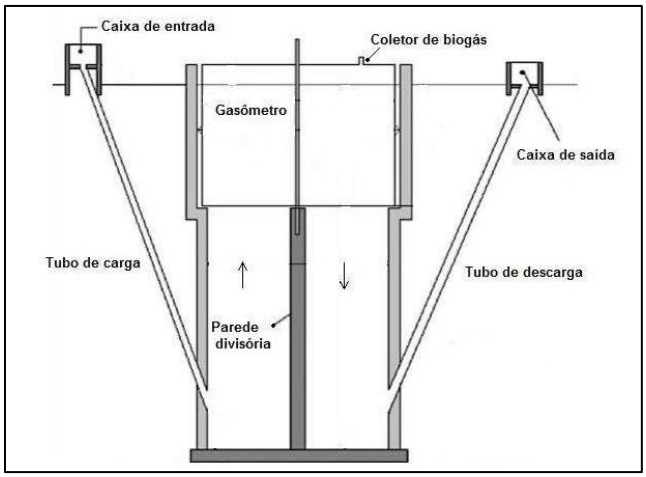
Fonte: Abreu-Neto, 2007.

3.1.1 Modelos de Biodigestores

Com o crescente interesse pela digestão biológica, muitos digestores biológicos têm sido propostos, com isso é possível dividi-los em duas grandes categorias: digestores biológicos para agricultura e biodigestores sanitários. É importante enfatizar que o biodigestor para fins sanitários pode ser instalados em estações de tratamento de efluentes em indústrias onde o lixo precisa ser eliminado, onde é usado principalmente na indústria alimentícia (MATAIYOSHI; POLETTI, 2019).

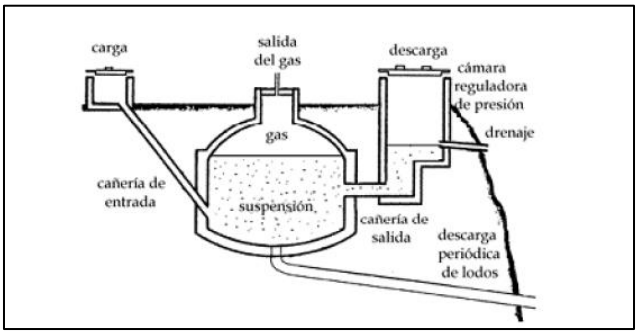
Nos biodigestores agrícolas, o modelo indiano (Figura 02) e o modelo chinês (Figura 03) são os mais antigos eles possuem uma forma e estrutura simples, conforme abaixo:

Figura 02 – Biodigestor Indiano



Fonte: SILVA, 2021.

Figura 03 – Biodigestor Chinês



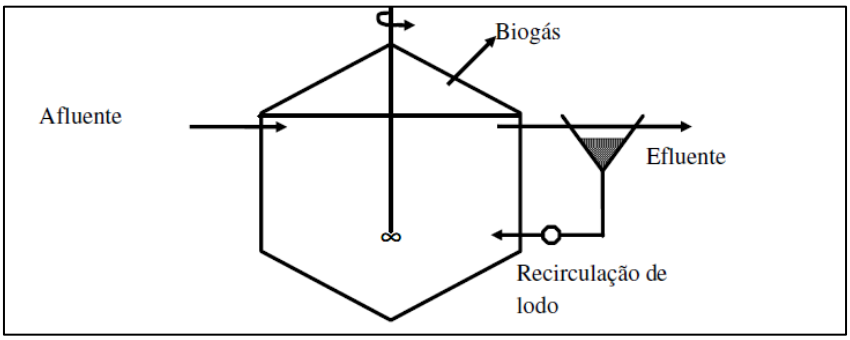
Fonte: Abreu-Neto, 2007.

Já para os biodigestores para uso sanitário ou industrial, podemos citar o reator perfeitamente agitado, conhecido como CSTR (continuous stirred-tank reactor). Uma das barreiras para o seu uso é o tempo hidráulico ou de retenção (TR), o CSTR e os biodigestores agrícolas levam cerca de 40 dias para que a reação seja eficiente e se houver a diminuição desse tempo, o processo falha porque as bactérias são "drenadas" do reator, em outras palavras, quando a taxa de diluição (o inverso do tempo de retenção) é maior do que a taxa de crescimento, as bactérias são realmente lavadas do reator (SARAVANAN SREEKRISHNAN, 2006).

Isso pode não ser um problema em fazendas, porque a vazão é bastante baixa, apenas processada o que a propriedade produziu, mas no tratamento de efluentes em escala industrial é muito grande, tornando o reator enorme, por exemplo, uma unidade que quer tratar 1.000 metros cúbicos de esgoto por dia precisará de um biodigestor CSTR de 40.000 metros cúbicos (SARAVANAN SREEKRISHNAN, 2006).

A primeira tentativa de resolver esse problema foi o biodigestor de contato. Neste tipo de sistema, o fluxo de saída é despejado e a lodo é enviada de volta para o biodigestor, o lodo contém bactérias e o tempo de retenção é reduzido, como pode ser explicado tendo a taxa de diluição que é maior do que a taxa máxima de crescimento e concentração de bactérias, sendo assim elas tendem a diminuir. No entanto, as bactérias retornam para o biodigestores vindas do lodo despejado, o efeito "lavagem" é realizado por Feedback do lodo para manter a concentração bacteriana, mantendo constante no biodigestor, conforme mostra a Figura 04 (SARAVANAN SREEKRISHNAN, 2006).

Figura 04 – Reator de Contato



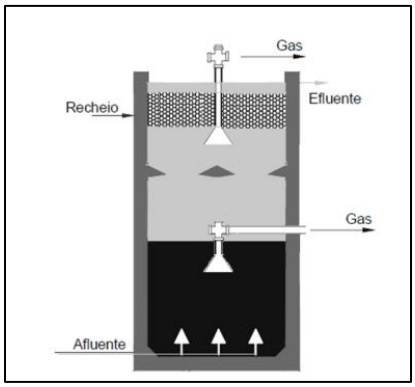
Fonte: SARAVANAN SREEKRISHNAN, 2006.

Existe o biodigestor filtro anaeróbico, que também tenta solucionar o problema que acontece no CSTR, nele as bactérias se reproduzem em suportes inertes que se transformam em biofilme, isso ocorre quando as bactérias se agrupam no suporte. Sendo assim o TR é diminuído, pois as bactérias estão unidas e não podem ser arrastadas para saída, além disso elas aumentam a sua densidade, devido a formação do biofilme, já que formam colônias, aumentando a velocidade do processo onde as bactérias são as próprias catalisadoras da reação (LETTINGA *et al*, 1980).

Com a descoberta do reator UASB, mostrado na Figura 01, houve uma grande melhoria para os biodigestores, pois ele possui TR na ordem de horas, fluxo ascendente, e no início das operações são utilizadas baixas vazões, e as bactérias dentro do tanque ao longo do tempo formam grânulos, que são decantados até o fundo do biodigestor. Nesta fase as vazões são elevadas, até o valor estabelecido no projeto, uma vez que a camada de lodo, por ser pesada, não será removida do reator, então obtêm um processo com alta velocidade. Entretanto este reator necessita de pessoal capacitado e com conhecimento microbiológico bem específico, porque se operado de forma errada haverá falhas durante todo o processo (LETTINGA *et al*, 1980).

Na mesma linha de estudo do reator UASB, surgiu o biodigestor de leito híbrido, mostrado na Figura 05, que é composto por um escoamento ascendente do afluente com o auxílio de um leito de lodo que fica na parte inferior e também de um “recheio” na parte superior contendo material para adesão de microrganismo, é nessa última parte que ocorre a retenção da biomassa contribuindo para a conversão da matéria orgânica, assim se torna o diferencial dele visto que no UASB isso não acontece (MICHELON, 2019).

Figura 05 – Reator de Leito Híbrido.



Fonte: MICHELON, 2019.

3.1.2 Projeto do Biodigestor

O biodigestor de leito híbrido é o que apresenta as melhores condições que se aproximam do reator UASB, devido a ele ser mais fácil de operar, além de possuir uma bomba de recirculação, eliminando a necessidade de vazão de entrada constante (LOMAS *et al* 1999).

O seu dimensionamento foi feito por LOMAS *et al* (1999), utilizando rejeitos de porco como substrato, e foi comprovado que o leito híbrido demonstrou uma maior eficiência para produção de gás em uma taxa de carregamento orgânico (TCO) de 20 kg de demanda química de oxigênio (DQO) por metro cúbico/dia, obtendo cerca de 5 metros cúbicos de biogás, de acordo a Equação (1).

$$TCO = \frac{CO.Q}{V} \quad (1)$$

CO= concentração de DQO no efluente (kg-DQO /m3-efluente)];

Q= vazão de efluente (m3-efluente/dia);

V= volume do biodigestor (m3);

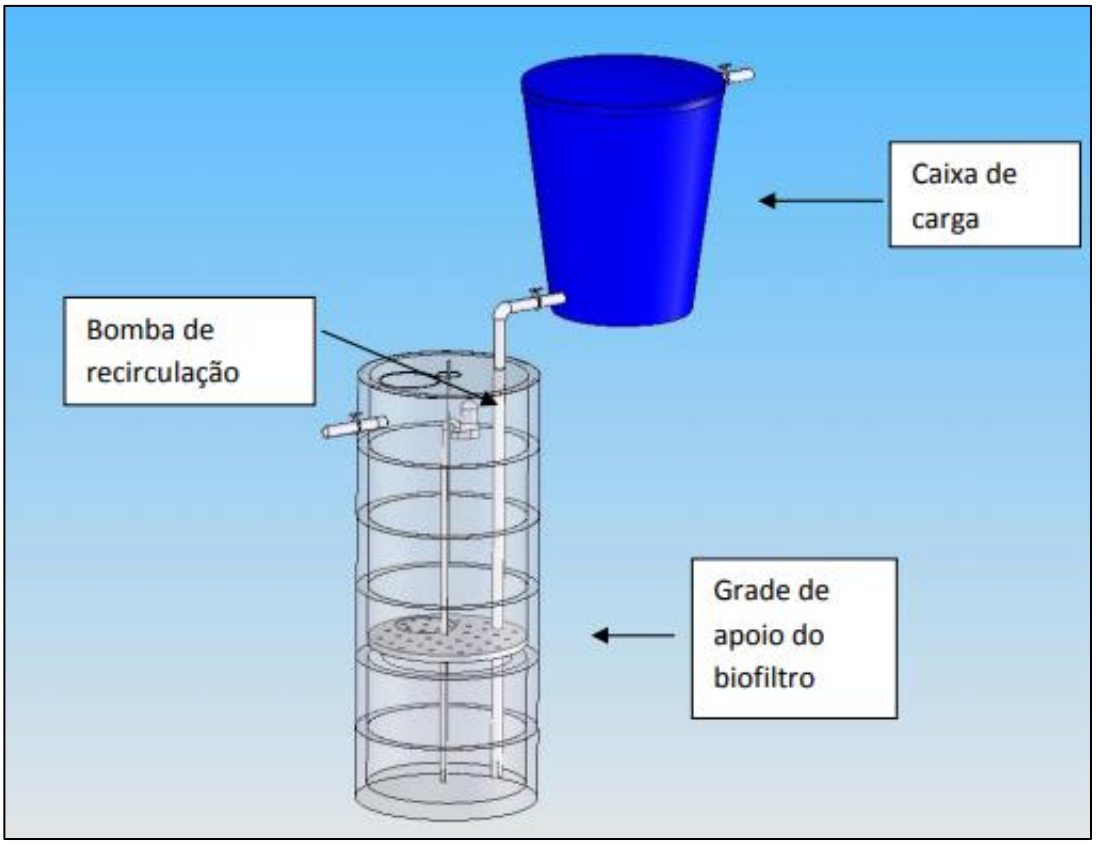
TCO= taxa de carregamento orgânico (kg-DQO/ m3-efluente.dia).

Pode-se também calcular o tempo de retenção hidráulica (TRH), através da Equação (2).

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

A figura proposta para o digestor é mostrada na figura 06. Pode-se perceber que o biodigestor possui seis manilhas de concreto e tubulações internas. Na sua parte superior, será instalado a caixa de carga, onde será acondicionado o substrato antes de ser adicionado no reator. Além disso, foi proposto o enchimento interno que fica no meio do biodigestor, juntamente com a bomba de recirculação.

Figura 6 – Digestor proposto



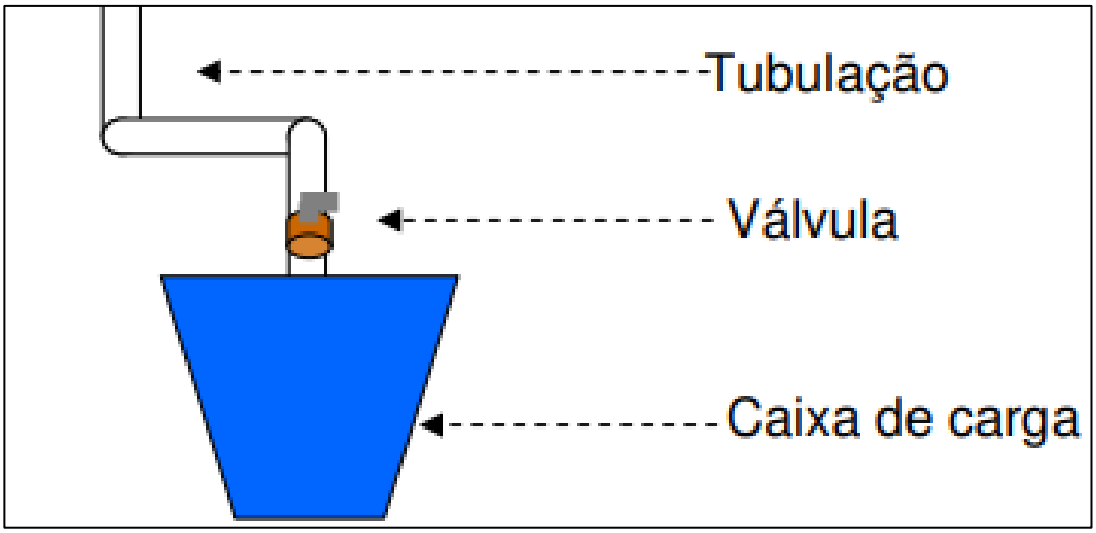
Fonte: LOMAS, 1999.

Foi proposto o enchimento interno para fazer a produção de biofilme, que irá aumentar a densidade do microrganismo, acelerando assim a produção de biogás. Desse modo, conseguimos também que o tempo de retenção do biodigestor seja menos, já que grande parte das bactérias se aderem e formam o biofilme. O reator poderá utilizar como substrato efluente industrial ou insumos provindos de fazendas.

O plano de operação do biodigestor foi elaborado de forma simplificada para a utilização dos funcionários do próprio sistema de estação de efluentes do local. Foi listado a seguir todo o passo a passo do processo:

Etapa 1: É feita a coleta de efluentes ou insumos, que é acoplado na tubulação que leva até a caixa de carga, existe uma válvula que permite a passagem ou não desse material.

Figura 7 – Trajeto ETE



Fonte: LOMAS, 1999.

Etapa 2: O efluente está armazenado na caixa de carga, e o processo começa a iniciar com a decantação do resíduo em 24 horas, e após isso é adicionado no biodigestor, entrando apenas o resíduo líquido.

Etapa 3: Quando o resíduo da fermentação entra no biodigestor, ele começa a ser consumido pelos microrganismos. O biodigestor se alimenta todos os dias, mas a alimentação não é contínua, o sistema se alimenta por meio de pulsos, uma vez ao dia, como os lotes contínuos. Ao sair do biodigestor, o resíduo é encaminhado por uma tubulação até um local adequado, que pode variar de acordo onde estiver instalado, e lá será mantido até o seu aproveitamento.

Etapa 4: Para eliminar os resíduos gerados pela estação de tratamento, após um determinado período, cerca de três meses depois, esses resíduos são usados para fertilizar as plantações ou doados para locais vizinhos. Portanto, os resíduos do biodigestor também devem ser armazenados.

3.2 Modelos Matemáticos

Modelagem matemática em biodigestores é feita para antecipar as possíveis variáveis do biogás gerado, e como funciona essas características de acordo a

quantidade de energia elétrica que é produzida. A quantidade e categoria do biogás que é produzido vai variar de acordo com o tipo de matéria orgânica que ele é composto, como ela foi tratada, variando de acordo com a temperatura, agitação e o tempo de retenção no reator (FRANTZ; SILVA, 2020).

Existe diversos estudos que demostram modelos matemáticos que fazem uma previsão da proporção e da qualidade do biogás gerado de acordo com a matéria prima (biomassa) que é utilizada. A literatura faz diversas análises, de acordo com a composição química e biológica do material orgânico, e qual o modelo matemático que melhor pode ser utilizado (FRANTZ; SILVA, 2020).

Com esta série de opções de biodigestores, uma ferramenta matemática é de suma importância para simular e otimizar esses sistemas, sem elas a simulação e otimização torna-se muito difícil para o processo. Portanto, cada tentativa de otimização, que pode levar meses para obter dados experimentais e a otimização, a depender do caso, devido a repetição de erros, pode levar anos. Não há dúvida de que a modelagem matemática facilitará essa otimização (FRANTZ; SILVA, 2020).

Pode-se ajustar o modelo para descrever um único conjunto de dados, condições experimentais, ou seja, condições de trabalho, e, em seguida, procurando o melhor ponto, através de simulação. No entanto, a falta de controle sobre o processo resulta em dificuldades no estabelecimento de modelos matemáticos, já que há um desafio a respeito do substrato utilizado no processo, pois pode ser altamente heterogêneo e composto de uma variedade de compostos orgânicos e inorgânicos, é difícil definir a composição da entrada em um biodigestor, consequentemente suas propriedades físico-químicas e as variáveis a quais estão expostas (FRANTZ; SILVA, 2020).

Além disso, as dificuldades estão relacionadas aos microrganismos que compõem o sistema, é difícil traçar todas as interações possíveis entre estes, microrganismos e bactérias produzem milhares de compostos orgânicos, cada bactéria consume um substrato específico. Se o modelo matemático tentar descrever todas as reações, isso seria bastante complexo, por isso o modelo sempre descreve partes simplificadas do processo e nem sempre fica claro até quanto é necessário descrevê-lo, sendo assim os modelos normalmente tentam demonstrar todas as etapas básicas do processo (SIEGRIST *et al*, 1993).

Alguns modelos matemáticos têm sido construídos para o processo de conversão da biomassa para em biogás, porém muitos utilizam dados complexos e é por isso

que houve uma crescente busca por otimização e melhoria desse processo, tomando que é de suma importância a modelagem matemática para o processo de biodigestão pois ele permite entender as características biológicas do conjunto, calcula de forma lógica as componentes e interações que são importantes no sistema, corrige as falhas e consegue fazer uma análise qualitativa do processo (NASCIMENTO, 2018).

3.2.1 Modelo de Monod

O estudo dos processos anaeróbicos é algo antigo, sendo que este modelo é o mais simples e fácil de ser estudado. No modelo de Monod, os processos de biodigestão são divididos em dois, onde no primeiro os componentes da biomassa são transformados em ácidos voláteis por bactérias denominadas acetogênicas, estes últimos gerados são convertidos em metano e dióxido de carbono por outro tipo de bactérias conhecidas como metanogênicas, e a cinética do processo de digestão anaeróbica é feita para cada grupo de forma separada (SILVA 2018), tendo como base na Equação (3), (4), (5) e (6) para compor o seu modelo.

$$\mu_x = \mu_{máx}\left(\frac{S}{K_s+S}\right) \tag{3}$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu_x x - k_d X \tag{4}$$

$$\frac{dP}{dt} = qX \tag{5}$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y_{X/S}}\left(\frac{dX}{dt}\right) + \frac{1}{Y_{P/S}}\left(\frac{dP}{dt}\right) + mX \tag{6}$$

$Y_{X/S}$ corresponde ao fator de conversão do substrato em células;

$Y_{P/S}$ o de conversão de substrato em produto;

μx a velocidade específica de crescimento;

P é a produtividade do produto;

X é a concentração é a concentração de células;
S a concentração de substrato;
t é o tempo de fermentação.

Este modelo é fácil de utilizar e simples, todavia é valido apenas para sistemas que não tenham interferências tal altas de inibidores.

3.2.2 Modelo de Saturação pela Célula

Podemos verificar na literatura algumas possibilidades de relacionar a velocidade específica com os fatores de inibição, sendo elaborado por Chattaway, Goma e Renaud um modelo que implica que a inibição é realizada pela concentração celular (SILVA 2018). A velocidade específica de crescimento celular foi demonstrada em função apenas da biomassa pela Equação (7).

$$\mu=\mu_{máx}\left(1-\frac{x}{x_{máx}}\right) \tag{7}$$

μmáx é a velocidade específica de crescimento máxima;
Xmáx igual a concentração celular máxima.

3.2.3 Modelo de Contois

Este modelo demonstra os cultivos que possuem pequena densidade celular e concentração de substrato, quando se tem altos valores dessas variáveis é necessário realizar modificações (SILVA 2018). Visto que a velocidade específica de crescimento celular diminui com a concentração celular, conforme mostra a Equação (8).

$$\mu = \frac{\mu_{máx} C_s}{K_x C_x + C_s} \quad (8)$$

KX o parâmetro do modelo de Contois;

CX a concentração das células;

CS a concentração de substrato;

μ máx é a velocidade máxima especifica de crescimento.

4 METODOLOGIA

A metodologia apresentada neste trabalho tem como característica uma pesquisa de origem bibliográfica, que se consiste na elaboração de diferentes conceitos e estudos que contribuem para o campo acadêmico a partir de diversos assuntos estudados (OLIVEIRA, 2002).

Este trabalho apresenta informações sobre a metodologia que pode ser aplicada para a modelagem e concepção de um biodigestor, para isso foi feito o levantamento de dados bibliográficos existentes, em artigos, dissertações, monografias e em outros meios, tanto de forma virtual como impressa. Após isso foi possível segregar as informações obtidas para enfim fazer o estudo e assim então toda informação importante foi agregado ao material.

Alguns modelos matemáticos têm sido construídos para o processo de conversão da biomassa para em biogás, porém muitos utilizam dados complexos e é por isso que houve uma crescente busca por otimização e melhoria desse processo. Por isso a escolha por apresentar equações que podem otimizar o modelo de Monod que é de simples entendimento, trazendo uma análise comparativa, mostrando as suas diferenças e buscando facilitar o seu entendimento delas (POLL, 2018).

Foi feita uma comparação entre diversos autores para avaliar os objetivos pretendidos por eles, a partir disso foi avaliado qual o resultado encontrado no seu estudo e a importância para o processo de biodigestão. Foram avaliados resultados como a velocidade da degradação da biomassa e inibição do crescimento celular em Marcelo Zaiat (2003), já em Adriana Biscaro e Helenice Florentino (2008) foi visto a concentração de microrganismos no efluente e a porcentagem de biogás gerado.

A partir disso foi possível demonstrar as peculiaridades, e complexidade da construção computacional das equações trabalhadas para o modelo de Monod, contribuindo para a escolha de qual pode ser a melhor adaptação a depender da necessidade do sistema, contribuindo com mais informação para a comunidade acadêmica acerca do conhecimento de biodigestores e obtenção de biogás.

Vale ressaltar que na escolha e seleção da literatura para abordagem dos modelos matemáticos, por mais que existam outros autores conhecidos e tipos de sistema que abordem outras equações, houve um diferencial em buscar apenas referências que

trabalhem com a equação de Monod como ponto de partida para suas equações, por se tratar de um Modelo mais conhecido e simples de trabalhar.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas pesquisas realizadas, os modelos matemáticos para biodigestores anaeróbicos foram apresentados por meio de observações dos tipos de bactérias e o meio que estão conseguindo entender as suas variáveis que influenciam no seu crescimento, neles é possível descrever a variação da concentração do substrato em um biodigestor, e a variação do seu consumo. Em alguns casos foram elaborados modelos que trabalham apenas com a quantidade de bactérias e o volume de biogás produzido, para facilitar o entendimento (CARNEIRO, 2019).

Para que seja possível realizar a construção de um biodigestor é necessário saber informações da estação de efluentes, como a suas características e comportamento, as taxas que as variações acontecem. A Equação (9) faz relação da taxa de variação da concentração do efluente no tempo da sua própria concentração é dada pela equação abaixo (ZAIAT, 2003).

$$\frac{dc_A}{dt} = \pm K_A * C_A{}^{nr} \tag{9}$$

C_A é a concentração do substrato (efluente);

KA é a constante de reação.

Na engenharia química para facilitar a modelagem de sistemas desse tipo é feito o balanço de massa de cada componente em sua fase, de forma separada, desse modo fica mais fácil realizar o balanço e entender a transferência de massa entre as fases, e para processo de biodigestão haverá transferência entre líquido-gás, sólido-líquido e gás-sólido. O balanço de massa de um biodigestor corresponde a entrada e saída no reator e as reações cinéticas que ocorrem na produção e degradação do substrato e material orgânico (POLL, 2018).

Seguindo a lei de conservação de massa, o volume de material que está acumulado deve ser o mesmo da entrada e que irá sair, seguindo a Equação (10).

$$\frac{d(C*V)}{dt} = Q.C_0 - Q.C + r_p * V - r_c * V$$

(10)

C é a concentração do composto/tempo;

C_0 é o afluente do composto;

V corresponde ao volume do biodigestor;

Q é a vazão e r_p é a taxa de reação de produção.

A taxa de variação de biomassa pode ser descrita pela Equação (11).

$$\frac{dX}{dt} = \left(\frac{Q}{V}\right) X_0 - \left(\frac{Q}{V}\right) X - K_d X + \mu X \tag{11}$$

Q corresponde a taxa de fluxo;

V ao volume do biodigestor;

X_0 a concentração de microrganismo;

X a concentração de microrganismo no biodigestor;

M é a taxa de crescimento;

K_d é a taxa de morte.

Pode-se calcular a taxa da concentração de substrato a partir da Equação (12).

$$\frac{dS}{dt} = \left(\frac{Q}{S}\right) S_0 - \left(\frac{Q}{V}\right) S - \frac{\mu X}{Y} \tag{12}$$

S_0 corresponde a concentração de substrato na entrada;

S é a concentração na saída;

Y é o coeficiente de fornecimento.

Foi apresentado por Marcelo Zaiat (2003) equações para englobar a modelagem matemática de Monod, de acordo Equação (13).

$$R_s = \frac{C_x}{Y_{x/s}} \mu_{\max} \frac{C_s}{K_s C_s} = R_{\max} \left(\frac{C_s}{K_s + C_s} \right) \quad (13)$$

R_{max} é a velocidade máxima de degradação da biomassa;

C_x a concentração dos microrganismos;

R_s velocidade de consumo da biomassa pelos microrganismos.

Esta equação demostra a função da velocidade de degradação da biomassa e pode ser aplicada para um faixa menor de concentrações de substrato.

A outra equação é direcionada para um faixa de concentração de substrato maior e sendo assim é possível ver que ocorre a inibição do crescimento celular apresentada na Equação (14).

$$\mu = \mu_{max} \frac{C_s}{K_s + C_s + \frac{C_s{}^2}{K_{is}}} \quad (14)$$

K_{is} é a constante de inibição/excesso substrato.

Também foi demonstrado por Adriana Biscaro e Helenice Florentino (2008) equações, a partir da de Monod, sendo que elas apresentaram duas equações trazendo a concentração de microrganismos no efluente e uma modelagem matemática para a porcentagem de obtenção de biogás de acordo com os valores de sólidos totais e voláteis.

$$X = \frac{(S_0 - S)Y}{1 + K_d 0} \quad (15)$$

X é a concentração de microrganismos no biodigestor;

So é a concentração do substrato limitante no efluente;

S é a concentração de substrato limitante;

Y é o coeficiente de obtenção celular.

A Equação (15) determina a concentração de microrganismos no efluente, em função da concentração de substrato no biodigestor.

A otimização do modelo matemático de Monod foi proposta através das equações (16) e (17) para demonstrar a eficiência da biodigestão, obtendo a porcentagem de biogás que é gerado a partir de sólidos totais (E) e os voláteis (E_v), conforme abaixo:

$$E = \frac{(C_0 a_0 100 - S2 - x1 - x2)}{C_0 10000} 100 \quad (16)$$

$$Ev = \left(\frac{(C_0 a_0 100 - S2 - x1 - x2)}{C_0 10000}\right) 100 \quad (17)$$

C_o é a concentração de resíduos no afluente em %;

a_0 é a concentração dos sólidos voláteis;

X é a fase da quantidade de microrganismo no reator;

S_2 é a fase do substrato quando forma o ácido.

As diferenças dos dois autores são apresentadas na Tabela 01, onde é feito o comparativo das equações que podem ser adicionadas no modelo de Monod.

Tabela 01 – Comparativo de equações do processo de biodigestão

Autor	**Equação**	**Resultado pretendido**	**Considerações da Equação**	**Variáveis adicionadas na equação de Monod**
Marcelo Zaiat	13	Determinação da velocidade da degradação da biomassa	Faixa baixa de trabalho da concentração de substrato	Velocidade máxima de degradação da biomassa, fator de crescimento
	14	Inibição do crescimento celular	Alta faixa de trabalho da concentração de substrato	Constante de inibição
Adriana Biscaro e Helenice Florentino	15	Concentração de microrganismos no efluente	NA	Concentração de microrganismos no biodigestor, concentração do substrato limitante no efluente, concentração de substrato limitante e coeficiente de obtenção celular.
	16 e 17	Porcentagem de biogás que é gerado	Com base sólidos totais e sólidos voláteis	Concentração de resíduos no afluente, concentração dos sólidos voláteis, fase da quantidade de microrganismo e substrato no reator

Fonte: autoria própria, 2021.

A partir disso é possível perceber que o processo de otimização da Equação de Monod pode ser realizado através de considerações e adição de variáveis relacionadas a concentração e crescimento microbiológico no modelo original. As equações apresentadas por Marcelo Zaiat (2003) utilizam uma quantidade menor de variáveis possibilitando uma modelagem computacional mais simples que a proposta por Adriana Biscaro e Helenice Florentino (2008). Também é apresentado por Zaiat (2003) o cálculo para velocidade da degradação da biomassa e inibição do crescimento celular, porém ele trabalha com concentração baixa de substrato, o que pode não ser muito bom em alguns biodigestores.

Todavia, Adriana Biscaro e Helenice Florentino (2008) propõem calcular a porcentagem de biogás que é gerado. Prever esse parâmetro para um biodigestor é de suma importância dado que a partir dessa quantificação podem ser feitos ajustes para uma maior produtividade do equipamento.

Existem diversos resultados pretendidos para ambos os autores, entretanto é necessário entender em qual sistema ele será instalado e qual os resultados pretendidos, além de conhecer as ferramentas computacionais disponíveis para trabalho, quantidade de biogás que será gerado e a concentração de microrganismos na biomassa, e então realizar a escolha de qual equação é mais interessante para trabalho.

Visto se o foco de trabalho for o substrato a Equação (13) e (14) são mais adequadas, mas se for a proposta de trabalho for focado no microrganismo pode-se mesclar ambos os autores, uma vez que eles tratam sobre esse assunto em todas as equações. Vale ressaltar, que as equações são de grande importância para os biodigestores e com elas é possível encontrar parâmetros que não seriam avaliados apenas com as equações existentes no modelo de Monod.

6 CONCLUSÃO

O conceito de biodigestão foi bem estabelecido e apresentado, sendo que diversos tipos de biodigestores já foram lançados e hoje já atuam em indústrias. Todavia, a seleção de um modelo adequado deve seguir alguns critérios, e o apresentado foi escolhido por conta da sua rápida instalação, baixo tempo de retenção, menor custo e permite a produção de eletricidade a partir do biogás.

Levando em consideração que a apresentação de sistemas como esses, de baixo tempo de retenção, foram elaborados por volta da década de 70, tendo o UASB como o que mais se destacou, e até hoje é bastante utilizado e opera em larga escala industrial pelo mundo todo, porém devido a sua complexidade é mais viável um sistema de biodigestão de leito híbrido, por ter uma operação mais simples, além disso, foi proposto um projeto de biodigestor acessível e de fácil instalação.

Quanto a abordagem do comparativo da modelagem matemática foi possível perceber as diferenças das equações foram apresentadas de acordo a Tabela 01. Portanto, a partir dela foi possível apresentar as variadas características dos trabalhos dos autores, trazendo as peculiaridades necessárias para inserção de novos parâmetros, proporcionando a melhoria do desempenho do modelo, destacando o crescimento microbiológico e porcentagem de biogás gerado.

Com esse estudo foi possível elaborar um guia para facilitar a escolha da equação para o modelo matemático utilizado na modelagem de biodigestores, considerando os ajustes necessários e os resultados que podem ser obtidos através da utilização do modelo de Monod, aumentando o conhecimento, contribuindo com pesquisas no campo de reatores anaeróbios e melhorando a obtenção de biogás.

REFERÊNCIAS

ABREU-NETO, M. S. Tratamento de águas residuárias de suinocultura em reator anaeróbio compartimentado seguido de reator UASB. Jaboticabal, 2007.xv.

ANDRADE, Laura Hamdan de. Tratamento de efluente de indústria de laticínios por duas configurações de biorreator com membranas e nanofiltração visando o reúso. 2015. 231 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais,, Belo Horizonte, 2015.

BASSANEZI, R. C.; FERREIRA, W. C. Jr. Equações diferenciais com aplicações. São Paulo: Harbra Ltda., 1988.

Biscaro, Adriana e Florentino, Helenice. 2008. Modelagem Matemática para determinação da eficiência da redução de ST e SV na biodigestão anaeróbica. Revista Energia para a Agricultura.

CARNEIRO, Rodrigo Braz**.** Avaliação do desempenho de biorreatores anaeróbios de leito fixo ordenado e empacotado para remoção dos antibióticos sulfametoxazol e ciprofloxacina. 2019. 132 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2019.

DEGANUTTI, R. P. *et al.* Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada. Departamento de Arquitetura, Artes e Representações Gráficas, UNESP: Bauru, 2002.

FRANTZ, Fabricia Carneiro Roos; SILVA, João Manoel Lenz Vianna da. Geração de energia elétrica utilizando biomassa: revisão de técnicas de modelagem matemática. In: jornada de pesquisa, 2020, Ijuí. Jornada de Pesquisa**.** 2020. v. 5, p. 56-67.

GASPAR, R. M. A. B. L. Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo-PR. 2003. 119p. Dissertação (Engenharia de Produção) - UFSC.

LETTINGA, G., VANVELSEN, A.F.M.,HOMBA, S.W.; DEZEEUW, W., KLAPWIJK, A. Use of the upflow sludge blanket reactor concept for biológical waste water treatmen especially for anaerobic treatment. Biotechnology and Bioengineering, v. 22, p. 699-734, 1980.

LOMAS, J. M., C. URBANO, AND L. M. CAMARERO. . Evaluation of a pilot scale downflow stationary fixed film anaerobic reactor treating piggery slurry in the mesophilic range. Biomass & Bioenergy, v. 17, p. 49-58, 1999.

MATAIYOSHI, Érika; POLETTI, Elaine. Modelagem matemática e estudo de funcionamento de biodigestores e de geração de biogás. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA UNICAMP, 2019, Campinas. **Resumos do.** [S.L.]: Universidade Estadual de Campinas, 2019. p. 27-67.

MICHELON, Leonardo Kozak. Avaliação da produção de biogás em um reator anaeróbio híbrido (UAHB) tratando esgoto sanitário sintético. 2019. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

NASCIMENTO, A. I. L. F.. Avaliação do Modelo de Monod para fermentação em caldo residual da casca de jabuticaba. 2018. 6 f. - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.

POLL, Eduardo Rodrigues. Estimação de parâmetros dos Modelos Cinéticos de Monod e Contois na produção de biogás de resíduos de curtume. 2018. 40 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SARAVANAN, V.; SREEKRISHNAN, T.R. Modelling anaerobic biofilm reactors-A review. Journal of Environmental Management, v. 81, p-1-18, 2006.

SAWYER, C. N.; MCCARTY, P. L. Chemistry for environmental engineering. New York. Ed. McGraw-Hill, 1978. ISBN 0070549710

SIEGRIST, H., RENGGLI, D. AND GUJER, W. Mathematical modelling of anaerobic mesophilic sewage sludge treatment. Wat. Sci. Technol., v. 27, p. 25-36, 1993.

SILVA, Ana Carolina Borges. MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOSSURFACTANTE UTILIZANDO MELAÇO DE SOJA. 2018. 108 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – Mg, 2018.

SILVA, Carlos Emílio Vieira da. Sustentabilidade: Avaliação da produção de biogás em um biodigestor de pequena escala. 2021. Dissertação (Mestrado) – Curso de Ambiente e Desenvolvimento, Universidade do Vale do Taquari – Univates.

SILVA, Natan Felipe. ANÁLISE ENERGETICA E ECONOMICA DA IMPLANTAÇÃO DO BIODIGESTOR INDIANO NA BOVICULTURA LEITERA. 2021. 23 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2021.

SILVA, W. T. L. da *et al.* Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbio para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola. Química Nova, v. 35, p. 35-40, 2012.

ZAIAT, Marcelo. 2003. Desenvolvimento e análise de biorreatores anaeróbios contendo células imobilizadas para tratamento de águas residuárias para. São Paulo, Brasil.