



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CAMPUS DO SERTÃO  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ARTHUR LIMA DA CUNHA

**SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE REATORES DESCONTÍNUOS  
TRATANDO EFLUENTES DE DIFERENTES NATUREZAS**

Delmiro Gouveia/AL

2022

ARTHUR LIMA DA CUNHA

**SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE REATORES DESCONTÍNUOS  
TRATANDO EFLUENTES DE DIFERENTES NATUREZAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus do Sertão.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Pedro de O. Netto.

Delmiro Gouveia/AL

2022

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca do Campus Sertão**  
**Sede Delmiro Gouveia**

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza CRB-4/2209

C972s Cunha, Arthur Lima da

Simulação do comportamento de reatores descontínuos tratando efluentes de diferentes naturezas / Arthur Lima da Cunha. - 2022.  
45 f. : il.

Orientação: Antônio Pedro de Oliveira Netto.  
Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas.  
Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2022.

1. Tratamento de efluentes. 2. Recursos hídricos. 3. Esgoto sanitário. 4. Demanda Química de Oxigênio – DQO. 5. Reator descontínuo. 6. Reator em batelada. I. Oliveira Netto, Antônio Pedro de. II. Título.

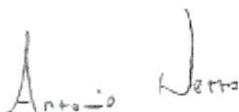
CDU: 628.21

## Folha de Aprovação

ARTHUR LIMA DA CUNHA

### **SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE REATORES DESCONTÍNUOS TRATANDO EFLUENTES DE DIFERENTES NATUREZAS**

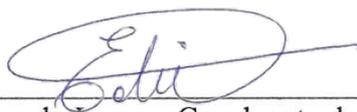
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao colegiado do curso de Engenharia  
Civil da Universidade Federal de Alagoas,  
Campus do Sertão, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Civil



---

Orientador: Prof. Dr. Antonio Pedro de Oliveira Netto

#### **Banca Examinadora:**



---

Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim



---

Eng. Luis Paulo Lima Cardoso

*“Resplandecente é a sabedoria, e sua beleza é inalterável: Os que a amam, descobrem-na facilmente.”*

*Sabedoria 6:12.*

Dedico esta monografia à Deus pela dádiva da vida, aos meus pais Jailson e Cristiana, pelo cuidado, incentivo e conselhos de vida, à minha família, aos meus amigos e à minha namorada Aparecida Martins, pelo amor, carinho e compreensão.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus pelo seu maior presente, a vida.

Aos meus pais, Jailson e Cristiana, pelo amor, carinho, incentivo, cuidado, ensinamentos e conselhos que me fez progredir nesta caminhada de vida.

À toda a minha família, pelo carinho, companheirismo e motivação de me tornar uma pessoa melhor a cada dia.

Ao professor Netto, pela sua orientação durante os anos de pesquisa de extensão, pesquisas científicas e, principalmente, para a elaboração desta monografia, além da paciência e sua transmissão de conhecimentos.

À minha namorada, Aparecida Martins, pelo amor, carinho, dedicação, atenção e suporte para meu trajeto de vida, um ser de luz que sempre ajuda a me erguer quando eu mais preciso.

Aos professores Francisca, Jéssica, Dayvson, Odair e Rogério de Jesus, pela didática e ensinamentos sobre o quão importante ter o diferencial no mercado da engenharia civil.

À meu tio David Cunha, por não medir esforços em me ajudar no desenvolvimento desta monografia.

Aos meus amigos de Graduação, em especial: Anderson, Lucas, Maxlander, Jefferson Gabriel e Saul, pela amizade, companheirismo, descontrações e momentos bacanas de estudo.

## RESUMO

Diante da problemática do tratamento de efluentes, o Brasil apresenta uma deficiência imponente no quesito esgotamento sanitário. No entanto, pela tentativa de solucionar essa problemática, fez-se necessário estudos mais aprofundados relacionados aos sistemas de esgotamento sanitário com recursos tecnológicos físicos e computacionais, tendo como complemento essencial a modelagem de unidades de tratamento, com o foco a análise do comportamento dos reatores em operação. No reator descontínuo (em batelada) os reagentes são colocados em contato no tanque e deixados, sob agitação, para que a reação ocorra. Industrialmente o reator descontínuo é usado para pequena produção e em laboratório é o reator ideal para estudos de cinética das reações. No caso de tratamento de águas residuárias por processos biológicos, o reator em batelada tem sido intensivamente estudado nos últimos anos devido a várias vantagens apresentadas como, por exemplo, a fácil higienização para novas produções, além da sua versatilidade e ótimo custo-benefício em comparação com os reatores contínuos. O estudo presente baseou-se em experimentos de dois trabalhos tratando efluentes distintos, com breve análise comparativa entre ambos, por meio da plotagem de gráficos dos dados reais e os obtidos via simulação através do software Vensim PLE®. Os resultados obtidos foram satisfatórios em ambos os reatores em batelada, já que o primeiro analisado foi o de Silva (2020), que em comparação com dados simulados do Vensim PLE®, constou eficiência de remoção de matéria orgânica, respectivamente, em torno de 60 e 53%, e correlação de Pearson ( $\rho$ ) de 0,894; e o segundo analisado foi a de Silva (2019), com eficiência em média de 62 e 56%, e similaridade de 0,754. Tal semelhança mostra que essa ferramenta pode ter grande aplicabilidade quando se trata de técnica de simulação computacional, para reatores biológicos em condições similares, tendo como vantagens a economia de tempo e recursos.

**Palavras-chave:** Esgotamento sanitário. Reator em batelada. Balanço de Massa. Pearson. Vensim PLE®.

## ABSTRACT

Facing the problem of wastewater treatment, Brazil presents an imposing deficiency in the sanitary sewage issue. However, in an attempt to solve this problem, further studies related to sanitary sewage systems with physical and computational technological resources have become necessary, having as an essential complement the modeling of treatment units, focusing on the analysis of the behavior of reactors in operation. In the batch reactor the reactants are placed in contact in the tank and left, under agitation, for the reaction to take place. Industrially, the batch reactor is used for small production and in the laboratory it is the ideal reactor for studies of reaction kinetics. In the case of wastewater treatment by biological processes, the batch reactor has been intensively studied in recent years due to several advantages, such as easy sanitation for new productions, versatility and cost-effectiveness when compared to continuous reactors. The present study was based on experiments of two works treating distinct effluents, with a brief comparative analysis between them, by plotting graphs of the real data and those obtained via simulation through the Vensim PLE® software. The results obtained were satisfactory in both batch reactors, since the first analyzed was that of Silva (2020), which in comparison with simulated data from Vensim PLE®, found organic matter removal efficiency, respectively, around 60 and 53%, and Pearson's correlation ( $\rho$ ) of 0.894; and the second analyzed was that of Silva (2019), with efficiency on average of 62 and 56%, and similarity of 0.754. Such similarity shows that this tool can have great applicability when it comes to computational simulation technique, for biological reactors under similar conditions, having as advantages the saving of time and resources.

**Keywords:** Sanitary sewage. Batch reactor. Mass balance. Pearson. Vensim PLE®.

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 01</b> – Municípios abrangidos pelas amostras de água entre 1995 e 2020.....	20
<b>Gráfico 02</b> – Municípios abrangidos pelas amostras de esgoto entre 2008 e 2020.....	20
<b>Gráfico 03</b> –Gráfico da DQO efluente do modelo batelada de SILVA (2020) direto do sistema Vensim PLE® .....	35
<b>Gráfico 04</b> – Gráfico comparativo da DQO do reator em batelada de SILVA (2020) com t=24h.....	35
<b>Gráfico 05</b> – Gráfico da DQO efluente do reator em batelada de SILVA (2019) direto do sistema Vensim PLE® .....	37
<b>Gráfico 06</b> –Gráfico comparativo da DQO do reator em batelada de SILVA (2019) com t=16h.....	37

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 01</b> – História e evolução do saneamento básico no Brasil.....	18
<b>Quadro 02</b> –Distribuição dos municípios segundo quantidade e população dos municípios.....	19
<b>Quadro 03</b> – Legislação brasileira sobre saneamento básico no decorrer dos anos.....	22
<b>Quadro 04</b> –Estudo de outros autores relacionados a eficiência de remoção de DQO em reatores descontínuos.....	36

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANA	Agência Nacional de Águas
DQO	Demanda Química de Oxigênio
LNSB	Lei Nacional do Saneamento Básico
ONU	Organização das Nações Unidas
PLANASA	Plano Nacional de Saneamento CONAMA
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta V$	Unidade infinitesimal do volume de matéria no reator	$m^3$
$\rho$	Coefficiente de correlação Pearson	
$C$	Concentração no efluente tratado	$mg \cdot L^{-1}$
$C_0$	Concentração no afluente	$mg \cdot L^{-1}$
$\frac{dm}{dt}$	Acúmulo de massa em função do tempo	$kg \cdot d^{-1}$
$E (\%)$	Eficiência de remoção de matéria orgânica	$\%$
$k$	Constante de reação	$h^{-1}$
$k_{med}$	Constante de reação média	$h^{-1}$
$m_E$	Fluxo mássico de entrada	$kg \cdot d^{-1}$
$m_R$	Fluxo mássico de entrada	$kg \cdot d^{-1}$
$m_S$	Fluxo mássico de entrada	$kg \cdot d^{-1}$
$n$	Ordem de reação global	
$r$	Velocidade de reação	$m \cdot h^{-1}$
$t$	Tempo de reação	$h$
$V$	Volume de controle dentro do reator	$m^3$

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1.1 Problema de Pesquisa</b> .....	16
<b>1.2 Objetivos da Pesquisa</b> .....	16
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	16
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	16
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	17
<b>2.1 Conceitos e evolução do saneamento no Brasil</b> .....	17
<b>2.2 Esgotamento sanitário no Brasil: números e reflexões</b> .....	19
<b>2.3 Tratamento de efluentes e seus impactos sociais</b> .....	21
<b>2.4 Diferentes formas de análise de efluentes</b> .....	23
2.4.1 <i>Análise cinética de reatores descontínuos</i> .....	23
<b>2.5 Do laboratório ao uso de softwares: diferenciais e vantagens dos diferentes métodos</b> .....	25
2.5.1 <i>O Vensim PLE® como ferramenta confiável para a realização de análise cinética de reatores descontínuos</i> .....	25
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	27
<b>3.1 Caracterização do Estudo</b> .....	27
<b>3.2 Coleta de dados</b> .....	27
<b>3.3 Procedimentos metodológicos</b> .....	28
3.3.1 <i>Equacionamento da constante cinética (K) a partir do Balanço de Massa</i> .....	28
3.3.2 <i>Simulando um reator em batelada utilizando o Vensim PLE®</i> .....	31
3.3.3 <i>Eficiência de reatores descontínuos</i> .....	32
3.3.4 <i>Similaridade de gráficos utilizando correlação Pearson (<math>\rho</math>)</i> .....	32
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	34
<b>4.1 Analisando o reator descontínuo do Silva (2020)</b> .....	34
<b>4.2 Analisando o reator descontínuo da Silva (2019)</b> .....	37
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	39
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	41

## 1 INTRODUÇÃO

Quando se trata de recursos hídricos, a água desempenha um papel fundamental em todo o território mundial, que é a sobrevivência da fauna e flora de todo um conjunto de ecossistemas presentes no planeta Terra, além de que Soares *et. al.* (2018) a apresenta como elemento essencial para a vida humana. De maneira complementar Guimarães *et al.* (2021) destaca a água como um recurso indispensável para as nossas funções orgânicas (Transporte de nutrientes, hidratação, eliminação de substâncias tóxicas, etc.), fazendo parte de diversas atividades dos seres humanos, como preparo de alimentos, irrigação, geração de energia, usos industriais, e entre outras.

Com a crise hídrica, incluindo os impactos ambientais gerados pela ação humana nas últimas décadas, segundo Souza (2021), pesquisadores e cientistas realizaram estudos relacionados ao sistema eficiente de abastecimento e coleta de água, junto com sistema de tratamento de esgoto sanitário e industrial. Esses sistemas não só previnem e controlam doenças que afetam a população de um local determinado, como também facilitam a atividade econômica e aperfeiçoam a produtividade do ser humano.

Tanto a coleta quanto o tratamento de esgoto são fatores fundamentais para a realização de um agrupamento de serviços de infraestrutura destinado a distribuição de recursos necessários para o bem estar humano, denominado saneamento básico. Contudo, colocando em contexto o território brasileiro, de 4744 municípios analisados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (2021), apenas 2807 cidades (59,2%) apresentam sistemas públicos de esgotamento sanitário, e o restante utilizam-se de alternativas para o tratamento de efluentes de forma individual (sumidouros, fossa séptica, fossa rudimentar, etc.).

Isso mostra que o Brasil ainda continua com alto grau de escassez com relação ao sistema de esgoto sanitário, pois tanto o avanço das indústrias nos dias atuais quanto o consumismo de maneira vertiginosa foram alguns dos pontos que ocasionaram o aumento da poluição no meio ambiente, principalmente no espaço hídrico, onde os seus rejeitos, caso não passem por um sistema de tratamento adequado iriam diretamente para rios, lagos e mares; afetando o equilíbrio ambiental como discorrido por Sá (2019) ao ratificar que os rejeitos quando não tratados afetam as características do líquido (pH, temperatura, oxigênio dissolvido, nitrogênio, fósforo) impactando negativamente na flora e na fauna.

Diante dessa problemática, faz-se necessário estudos mais abrangentes sobre tecnologias inéditas para tratamento de efluentes, especificamente sobre reatores ideais, já

que de acordo com Rollemberg *et al.* (2019), eles são responsáveis pela viabilização das reações químicas, visando a produtividade e a qualidade maximizada do produto final, além do seu custo-benefício satisfatório e seu formato em escala experimental que para Schmal (2017) tem como essência fenômenos de superfície e fenômenos de transporte de energia e massa.

Reatores descontínuos, apesar de serem sistemas de operação em regime fechado, ou seja, há a ausência de entrada e saída de matéria orgânica durante a reação, ainda assim Pires *et al.* (2019) destaca que eles possuem alto grau de importância quando se trata de estudos sobre remoção de compostos orgânicos em escala laboratorial, justamente por serem reatores mais econômicos comparados com os contínuos, além de sua higienização fácil para produção e alta flexibilidade para diversos tipos de operações.

Ainda tratando-se de reatores em batelada, como a sua operação relaciona a rapidez de uma transformação química com as concentrações dos reagentes em quantidade de matéria, vale destacar a determinação das constantes cinéticas enredada nas reações, visto que elas têm como intuito estimar as velocidades de reação durante o processo biológico, simplesmente por fazerem parte de uma grandeza abrangente formada de produtos que para Schmal (2017) dependem dos seguintes fatores: Temperatura, pressão e concentração dos reagentes e produtos da reação.

A simulação de dados para sistemas de tratamento biológicos é de grande valia, considerando a tentativa de avaliar o comportamento de sistemas biológicos, pois o processo de modelagem, de acordo com Fernandes (2021), é uma prática tanto utilizada para verificação do funcionamento de um sistema quanto para o dimensionamento em si, visando representar, da melhor forma possível, um sistema real através de equações matemáticas num modelo criado. Além disso, ele destaca a principal vantagem do uso de softwares de modelagem, que é a velocidade inigualável na obtenção dos resultados com redução dos erros comuns que acontecem aos humanos após roteiros de cálculos matemáticos longos, trazendo informações rápidas e válidas caso a execução de um modelo seja bem elaborado. Diante a este fundamento, Silva (2020) complementa que esta forma de reprodução de dados em sistemas computacionais emula o comportamento real de um sistema, feita a partir de um modelo, permitindo assim investigar o efeito de vários parâmetros, de forma rápida, segura e mais econômico em comparação com ensaios à escala piloto ou industrial

Este estudo teve como finalidade a análise de dados operacionais da Demanda Química de Oxigênio (DQO) Bruta de pesquisas científicas desenvolvidas no laboratório de saneamento da Universidade Federal de Alagoas – UFAL, por meio do equacionamento da

constante cinética a partir do balanço de massa juntamente com os resultados das constantes para cada amostra verificada. Após os valores encontrados, insere-se a constante cinética média no software de modelagem de sistemas dinâmicos (Vensim PLE<sup>®</sup>) para a realização da plotagem de gráficos e, posteriormente, a elaboração da análise comparativa entre os gráficos de DQO em laboratório e DQO simulado pela ferramenta de modelagem visual, tanto pelas suas similaridades entre si quanto pelos seus percentuais de eficiência.

### **1.1 Problema de Pesquisa**

Considerando a relevância do saneamento e o cenário da destinação de efluentes, surge o problema de pesquisa: **Como simular o comportamento da remoção de demanda química de oxigênio de efluentes tratados em reatores descontínuos através do uso de software de modelagem de dinâmica de sistemas?**

### **1.2 Objetivos da Pesquisa**

Para responder ao problema de pesquisa foi definido um objetivo geral, além de um conjunto de objetivos específicos, conforme detalhados a seguir.

#### *1.2.1 Objetivo Geral*

Realizar a análise comparativa entre os resultados experimentais da operação de reatores descontínuos e os dados obtidos através da simulação realizada com apoio do Vensim PLE<sup>®</sup>, em prol da validação do software para acompanhamento do comportamento de sistemas biológicos.

#### *1.2.2 Objetivos Específicos*

- Obter modelos e parâmetros cinéticos para a remoção de matéria orgânica, em reatores descontínuos tratando efluentes de diferentes naturezas;
- Validar os modelos obtidos fazendo comparações com os dados experimentais de sistemas de tratamento similares;
- Propor a utilização do software Vensim PLE<sup>®</sup> para a análise da dinâmica dos sistemas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Conceitos e evolução do saneamento no Brasil

As definições de saneamento, seja básico ou ambiental, apesar de terem aparência simplificada e objetiva, possuem grau de importância elevado ao colocar esse fator no âmbito social e territorial, pois para Oliveira *et al.* (2021) está ligado às realizações em prol de uma determinada sociedade que busca melhores condições de vida, como a coleta sanitária, abastecimento de água potável e tratamento de água e efluentes, por exemplo.

A Lei Federal Nº 11.445/07 em artigo 3º, apresenta o conceito de saneamento básico como “conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais”, seja de abastecimento de água, limpeza urbana, drenagem, esgotamento sanitário e manejo de resíduos sólidos e águas pluviais urbanas, com o intuito de introduzir condições básicas sanitárias em favor da sobrevivência da população, tudo isso sob responsabilidade dos entes federativos: União, Estados, Municípios e Distrito Federal.

Já no quesito saneamento ambiental, consoante ao programa de saneamento básico do Ministério da Saúde (2002), ele é caracterizado como conjunto de ações socioeconômicas que têm por objetivo alcançar níveis de salubridade ambiental, por meio do abastecimento de água potável; coleta e disposição sanitária de resíduos sólidos, líquidos e gasosos. Já a Lei Estadual de São Paulo, Nº 7.750, de 31 de Março de 1992 apresenta salubridade ambiental como a qualidade ambiental capaz de prevenir a ocorrência de doenças veiculadas pelo meio ambiente e de promover o aperfeiçoamento das condições mesológicas favoráveis à saúde da população urbana e rural.

Desde o período colonial no Brasil até os dias atuais, houve uma evolução significativa da evolução do sistema de saneamento básico, apesar de existência de fatores que prejudicaram o seu melhoramento, entre os quais Carneiro *et al.* (2018) apontaram: baixo investimento, projetos técnicos de baixa qualidade e escassez de financiamento e planejamento, por exemplo. Para melhor esclarecimento sobre este caso, segue o quadro 01, realçando processos evolutivos no decorrer dos anos sobre o sistema de abastecimento de água e sistema de tratamento de efluentes. A estrutura do quadro a seguir, em relação ao período do contexto, foi desenvolvida em formato crescente, com o propósito de demonstrar desde o seu surgimento até as situações históricas atuais, seguindo a linha cronológica da evolução do saneamento em território brasileiro.

**Quadro 01** – História e evolução do saneamento básico no Brasil.

ANO	CONTEXTO
1561	O fundador Estácio de Sá mandou escavar o primeiro poço para abastecer o Rio de Janeiro.
1744	Construído o primeiro chafariz em território nacional e, ao mesmo tempo, realizou-se ações de saneamento de forma individual através de drenagem de terrenos.
1940	Início da comercialização dos serviços de saneamento, formada por autarquias e mecanismos de financiamento para o abastecimento de água.
1971	Instituiu-se o Plano Nacional de Saneamento – PLANASA, com o objetivo de diminuir os impactos ambientais e socioeconômicos gerados pelos resíduos industriais e o alto consumo humano.
1981	Criação do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, órgão colegiado brasileiro responsável pela adoção de medidas de natureza consultiva e deliberativa acerca do Sistema Nacional do Meio Ambiente.
1988	Implementação do fator saneamento na Constituição Federal de 1988, constado no art.21, que atribui a União a competência para instituir diretrizes para o desenvolvimento urbano.
1995	Fundação do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, que reúne informações e indicadores sobre a prestação dos serviços de Água, Esgotos, manejo de Resíduos Sólidos e manejo de Águas Pluviais, provenientes dos prestadores que operam no Brasil.
2000	Criação da Agência Nacional de Águas – ANA, integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH.
2007	Lei Nº 11.445/07, que estabelece a Lei Nacional do Saneamento Básico – LNSB, onde os municípios conquistaram a titularidade dos serviços de saneamento, estabelecendo diretrizes nacionais para o Saneamento Básico no Brasil
2015	Houve a elaboração e o aprimoramento do Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB, que tem como foco o norteamento da condução de políticas públicas, metas e estratégias para o setor de saneamento.
2020	Realizou-se a Lei Federal 14.026, de 15 de Julho de 2020, chamada “Novo Marco Regulatório do Saneamento”, que altera as regras para a prestação de serviços no setor, promovendo a ampliação da participação de empresas privadas, com o objetivo de universalizar o acesso ao saneamento para todas as residências brasileiras.

Fonte: Adaptado de Carneiro *et al.* (2018); BRASIL (1988).

Diante os acontecimentos apresentados no quadro 01, mostra que todos esses feitos relacionados ao saneamento básico, tanto as suas aplicações físicas quanto legislativas, foram benéficas para a sociedade brasileira, visto que todos esses fatos ocorridos tiveram as mesmas essências, que são o direito à vida e a dignidade humana.

## 2.2 Esgotamento sanitário no Brasil: números e reflexões

Quando se trata da análise quantitativa sobre o esgotamento sanitário no Brasil, a recomendação utilizada para esse estudo específico é a extração de dados obtidos pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, pois além de seu conhecimento ser algo norteador no quesito planejamento e gestão do setor, ele apresenta um conjunto de dados estruturais mais precisos, permitindo assim avaliar a evolução de serviços, tanto do abastecimento de água quanto do esgotamento sanitário. Para assimilação mais clara, tem-se o quadro 02 e os gráficos 01 e 02 a seguir:

**Quadro 02** – Distribuição dos municípios segundo quantidade e população dos municípios.

ANO	TIPO	QUANTIDADE MUNICIPAL (ÁGUA)	QUANTIDADE MUNICIPAL (ESGOTO)	POPULAÇÃO (ÁGUA)	POPULAÇÃO (ESGOTO)
2011	Completo	4.931	1.951	157.909.219	130.523.871
	Simplificado	10	974	74.776	10.018.984
2012	Completo	5.064	2.221	160.324.346	135.413.292
	Simplificado	6	1.427	36.450	13.539.526
2013	Completo	5.030	2.221	165.664.407	139.907.746
	Simplificado	5	1.509	32.903	14.800.997
2014	Completo	5.106	2.332	167.898.090	142.790.995
	Simplificado	8	1.698	52.845	15.723.415
2015	Completo	5.077	2.314	168.920.848	144.455.183
	Simplificado	11	1.484	61.674	14.125.935
2016	Completo	5.161	2.495	170.870.616	148.175.349
	Simplificado	11	1.589	61.494	13.964.630
2017	Completo	5.117	2.444	172.078.196	149.385.097
	Simplificado	9	1.421	36.644	12.012.474
2018	Completo	5.136	2.519	173.167.252	151.565.746
	Simplificado	10	1.546	36.663	13.033.921
2019	Completo	5.177	2.592	174.719.653	152.350.367
	Simplificado	14	1.642	52.281	13.164.588
2020	Completo	5.337	2.807	-	-
	Simplificado	13	1.937	-	-

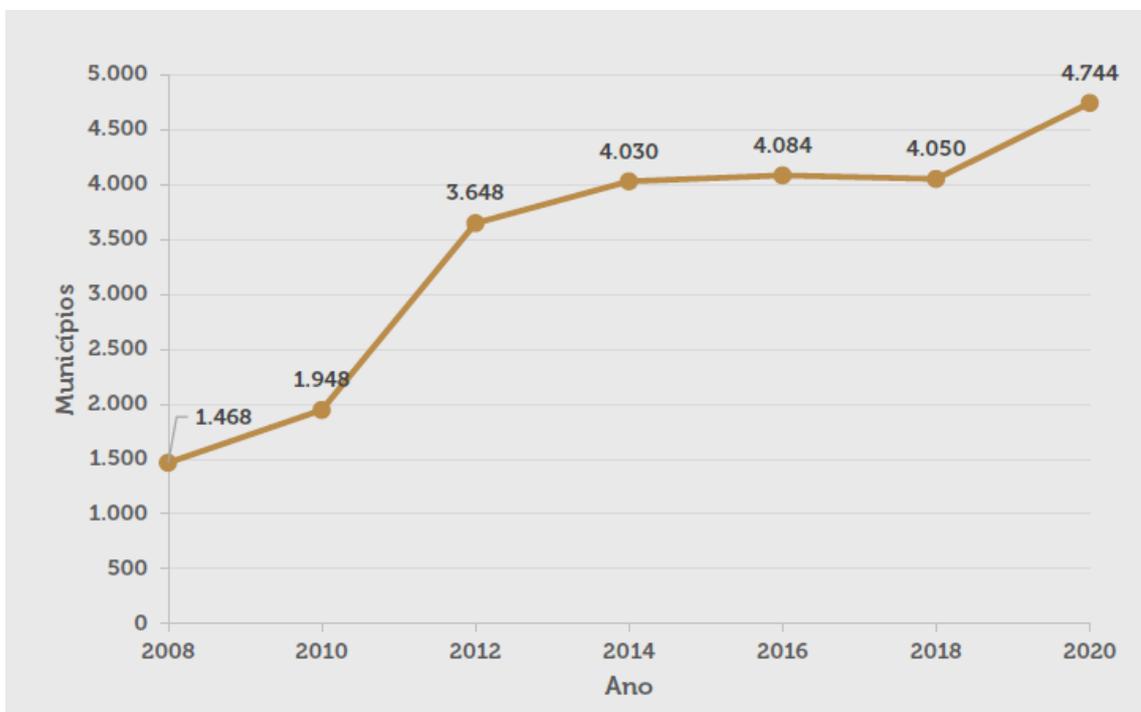
Fonte: SNIS (2011-2020)

**Gráfico 01** – Municípios abrangidos pelas amostras de água entre 1995 e 2020.



Fonte: SNIS (2021)

**Gráfico 02** – Municípios abrangidos pelas amostras de esgoto entre 2008 e 2020.



Fonte: SNIS (2021)

Perante o exposto no quadro 02 mais os gráficos 01 e 02, percebe-se que, no decorrer dos anos, a quantidade de estações de tratamento de água e esgoto cresce de uma forma significativa, beneficiando milhares de pessoas que moram em território brasileiro. No entanto, colocando em caso específico o esgotamento sanitário, os números não se referem totalmente ao sistema público de esgotamento sanitário, já que o SNIS (2021) aponta que parte desses valores se estende a soluções alternativas individuais, como fossa séptica, fossa rudimentar e valas a céu aberto. Por isso tem-se a necessidade de estudos sobre reatores para tratamento de esgoto, posto que a diminuição de sistemas alternativos e aumento no sistema público com tecnologia avançada para remoção de matéria orgânica, o seu tratamento passa a ser realizada de forma mais rápida e eficiente, aumentando a qualidade de vida da sociedade em determinado local e, diretamente proporcional, o ranking de saneamento básico no mundo.

### **2.3 Tratamento de efluentes e seus impactos sociais**

A introdução de substâncias de efeito negativo em águas, de acordo com Machado *et al.* (2022), tanto por resíduos de cunho industrial quanto restos de origem doméstica, é uma das principais causas do desprovimento de recursos hídricos, além do seu uso desajustado e má conservação das nascentes ou fontes. Desse ponto, quanto o maior grau de teor de contaminação gerada na água, mais etapas de tratamento são necessárias para ajustar as características do líquido em seu formato limpo e com nutrientes, aumentando assim o seu custo operacional. Os estudos de Miranda *et al.* (2021) diagnosticaram que a implantação das leis de controle ambiental auxiliam no monitoramento da qualidade das águas, com a intenção de reduzir parâmetros que levem ao nível de degradação ambiental dos corpos hídricos.

Casos de implicações danosas ao meio ambiente, e também ao meio social, ocorrem de maneira elevada em locais metropolitanos litorâneos, onde grande parte desses pontos, há um alto grau de suscetibilidade durante a trajetória dos efluentes, sendo o sistema de esgoto sanitário precário, e o seu destino final, o mar. Como há ocorrências de não haver um sistema de tratamento de efluentes adequado para este tipo de situação os escritos de Duarte (2021) discorreram que são gerados impactos negativos em diversos fatores: Impactos sociais — proliferação de doenças (cólera, leptospirose, verminoses, hepatite A, etc.); impactos ambientais — diminuição na qualidade de água, eutrofização e diminuição da biodiversidade no entorno; impactos econômicos — diminuição de geração de renda da população.

Para a amenização desses impactos negativos, o foco principal foi a elaboração de leis, resoluções e diretrizes nacionais para o saneamento básico, visando o controle de lançamento de poluentes no meio ambiente e a proibição o lançamento de dejetos nocivos aos seres vivos e entre outros elementos da natureza. Para melhor clareza sobre a legislação do saneamento básico, segue o quadro 03:

**Quadro 03** – Legislação brasileira sobre saneamento básico no decorrer dos anos.

ANO	LEGISLAÇÃO	DESCRIÇÃO
1988	CONAMA 005	Dispõe sobre o licenciamento ambiental nas obras de saneamento.
2005	CONAMA 357	Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.
2006	CONAMA 375	Define critérios e procedimentos, para uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados.
2007	LEI 11.445/07	Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico.
2011	CONAMA 430	Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementando e alterando a resolução 357 do CONAMA.

Fonte: BRASIL (2007); CONAMA (1988); CONAMA (2005); CONAMA (2006); CONAMA (2011)

Fazendo uma breve análise comparativa entre as legislações citadas no quadro 03, desde a questão documental para que a execução do sistema possa ser legalizada, até as formas de lançamento de efluentes, ambos têm como intuito o estabelecimento de padrões de qualidade para as águas, auxiliando no progresso do país em termos ambientais, políticos, e também, socioeconômicos.

Seguindo a nível mundial, a referência para tratar-se de questões sobre saneamento é a Organização das Nações Unidas – ONU (2010), em que a partir da Assembleia Geral das Nações Unidas por meio da resolução A/RES/64/292, declara que tanto o saneamento quanto a água potável são direitos humanos essenciais para usufruir, de maneira plena, a vida e entre

outros direitos do indivíduo. Conforme abaixo sobre a importância da água para o meio social:

“A água potável segura e o saneamento adequado são fundamentais para a redução da pobreza, para o desenvolvimento sustentável e para a prossecução de todos e cada um dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio”. (ONU, 2010).

Infelizmente, nos dias atuais, ainda existem países que sofrem bastante com a crise hídrica, sendo as circunstâncias principais a ação humana (desmatamento, desertificação, lixiviação, poluição, entre outras) e a própria natureza da região afetada por meio do clima e da vegetação local. Por isso a necessidade da aplicação da resolução da ONU relacionada a água potável, já o consumo do líquido tratado é direito legal do homem, colaborando também com a diminuição da desigualdade social, dever este sobre responsabilidade do governo federal de cada país.

## **2.4 Diferentes formas de análise de efluentes**

A análise de efluentes pode ser feita de diversas formas, seja de maneira física, química, biológica, ou até mesmo por combinações físico-químico ou químico-biológico. Para esta circunstância intrínseca, o ponto de maior relevância é no processo da cinética química de tratamento de resíduos, pois além de se tratar da movimentação/transformação de partículas presentes no reator cinético, há também a inserção de elementos químicos durante a sua operação, com o escopo a qualidade do produto final.

### *2.4.1 Análise cinética de reatores descontínuos*

A cinética química, de acordo com Angelucci e Godoi (2010), é a esfera da química que tem como intuito definir a velocidade das reações, além da alternância da composição dos estados energéticos em função do tempo. Colocando em destaque os reatores descontínuos ou em batelada, Sarti *et. al.* (2005) descreve que eles possuem um teor significativo na análise da remoção de matéria orgânica, não apenas para aplicação em escala real, como também a aferição das velocidades de reação e parâmetros cinéticos em laboratório para aplicações futuras.

Em reações simples, conforme Zaiat (2005), um dos principais objetivos da cinética química é a consecução de uma fórmula matemática que represente o comportamento do sistema, com expressões a nível trivial e, caso possível, propensos de representação gráfica com fácil visualização. Para isso, Von Sperling (1996) faz uma representação associativa entre a velocidade de reação, a concentração do reagente e a ordem de reação, mediante a formulação a seguir:

$$r_c = \pm kC^n \quad (1)$$

$r_c$  = Velocidade de reação ( $mL^{-3}h^{-1}$ )

$k$  = Constante de reação ( $h^{-1}$ )

$C$  = Constante do reagente ( $mL^{-3}$ )

$n$  = Ordem de reação global

No caso da ordem de reação global, ela é classificada para diferentes situações: reação de ordem zero ( $n = 0$ ), reação de primeira ordem ( $n = 1$ ) e reação de segunda ordem ( $n = 2$ ). Tratando-se de reatores descontínuos em que a velocidade de reação depende da concentração do reagente, e que o reagente está desaparecendo dentro do volume reacional por intermédio aos mecanismos de degradação, a sua reação é de primeira ordem. Portanto, seguindo a linha de Von Sperling (1996), tem-se a seguinte expressão:

$$\frac{dC}{dt} = -k * C^1 \quad (2)$$

Integrando a equação (2) para  $t = 0$ , tem-se como resultado:

$$\ln C = \ln C_o - kt \quad (3)$$

$C_o$  = Concentração do reagente inicial ( $mL^{-3}$ )

Partindo da equação (3), isolando a constante de reagente (C), pode ser reescrita desta forma:

$$C = C_o * e^{-kt} \quad (4)$$

Sobre reações que ocorrem no tratamento de efluentes, em sua maioria, elas seguem uma cinética de primeira ordem. Vale citar como exemplo a introdução de oxigênio no sistema de tratamento por aeração superficial, em que conforme Von Sperling (1996), a bioestabilização de orgânicos, de maneira geral, se desenvolve com cinética de primeira ordem defeituosa, pois o mecanismo de processamento envolve vários componentes, podendo afetar no processo pela alta variância nas concentrações. Devido à concentração de oxigênio ou microrganismos, mesmo com diversos mecanismos de movimentação ou frequência, a reação obedece a uma cinética de primeira ordem, e a velocidade da reação é proporcional à concentração do reagente de menor nível (orgânico), desde que outros compostos estejam em relativa abundância, porém, se a concentração de orgânicos for baixa, a taxa apresenta um aspecto constante, semelhante às reações de ordem zero.

## **2.5 Do laboratório ao uso de softwares: diferenciais e vantagens dos diferentes métodos**

Por meio de avanços tecnológicos computacionais, de maneira particular a introdução e aprimoramento de softwares relacionados a simulação de dados operacionais, possui um alto grau de importância no quesito da abordagem prática da ciência da computação, visto que a utilização de ferramentas de mesmo cunho, em conformidade com Chwif e Medina (2014), consegue capturar com mais precisão as características de tempo, estado e natureza, e que, a partir de softwares, esses dados capturados são repetidos em um computador com comportamento semelhante ou equivalente ao que o sistema real apresenta, contribuindo assim o seu processo decisório.

### *2.5.1 O Vensim PLE® como ferramenta confiável para a realização de análise cinética de reatores descontínuos*

A dinâmica de sistemas é um conjunto de métodos e ferramentas, com desígnio a modelagem de problemas complexos, onde mecanismos de realimentação são elementos fundamentais do sistema. A modelagem dinâmica do sistema, de acordo com Chwif e Medina (2014), se concentra nas relações causais entre variáveis ou elementos. A base dos modelos de sistemas dinâmicos é o feedback. Diante a esse método computacional de simulação, um ponto de grande importância que merece ser ressaltado é de que:

A Dinâmica de Sistemas (DS) desenvolveu-se quase junto com o Pensamento Sistêmico, derivado da Teoria Geral do Sistema (TGS), que aponta para uma visão de mundo onde os inter-relacionamentos e suas estruturas condicionam o comportamento dos sistemas que nos rodeiam. A DS permite que façamos modelos da maioria dos sistemas conhecidos e, com o apoio de alguns softwares para uso em computadores pessoais, possamos simular o comportamento desses sistemas ao longo do tempo (COSTA, 2004).

O software comumente utilizado para simular processos dinâmicos é o Vensim®, desenvolvido pela Ventana Systems para solucionar problemas de gestão. Ristic *et al.* (2016) descreve que esta ferramenta computacional tem a vantagem de poder programar em qualquer linguagem de programação (funções externas) e oferece a possibilidade de importar modelos desenvolvidos por outros softwares utilizados na modelagem e simulação.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Caracterização da pesquisa

O estudo em questão foi desenvolvido em caráter quantitativo e experimental por meio da análise de dados operacionais de reatores trabalhados em laboratório, incluindo o uso do software de modelagem de dinâmica de sistemas, *Vensim PLE®*, para simulação de dados da concentração da Demanda Química de Oxigênio (DQO) efluente, que tem como ponto chave a análise comparativa entre os valores reais e simulados, verificando assim suas similaridades entre as linhas de gráfico, como também suas respectivas eficiências com relação a remoção de matéria orgânica.

### 3.2 Coleta de dados

Para a realização desta pesquisa foi realizada uma revisão da literatura com coleta de dados em revistas, artigos, teses, livros e documentos que versam sobre a temática abordada. Em seguida foi realizada a análise de dados operacionais de pesquisas científicas anteriores relacionadas a avaliação do desempenho de filtro biológico como pós-tratamento de reator em batelada.

As amostras físicas foram desenvolvidas em laboratório de saneamento da Universidade Federal de Alagoas, Campus Sertão, tendo como orientação dois estudos: Um desenvolvido por Silva (2020), sendo a sua coleta feita na fossa séptica da UFAL Campus Sertão, com reator descontínuo operando num ciclo total de 27 horas e 30 minutos (24 horas de tempo de agitação mais 3 horas e 30 minutos de sedimentação); e o outro por Silva (2019), utilizando águas residuárias no seu processo de tratamento provinda da indústria de embalagens localizada em Delmiro Gouveia-AL, especificamente sacolas plásticas, usando o mesmo tipo de reator, operando com ciclo total de 24 horas (16 horas de agitação mais 8 horas de sedimentação).

Após a coleta de dados, foi realizado um equacionamento da constante cinética de acordo com as características dos reatores, para que assim possam ser feitos os cálculos para cada amostra de cada pesquisa estudada, lançando suas informações e resultados das constantes cinéticas obtidas no *Vensim PLE®*, extraindo o comportamento das curvas do consumo de DQO e, por fim, foi feita sua verificação por meio da correlação de Pearson entre

os dados da demanda química de oxigênio em laboratório e os gerados pelo software utilizado.

### 3.3 Procedimentos Metodológicos

Quanto aos procedimentos metodológicos, a pesquisa foi desenvolvida em formato quantitativo, pois para a construção desta monografia foi utilizado dados experimentais de reatores estudados, tendo como seu escopo a realização da análise comparativa do comportamento operacional entre os reatores em laboratório com o executado pelo Vensim PLE®. Este formato de pesquisa, conforme Proetti (2017), tem como objetivo demonstrar, de forma quantificada, a importância de dados coletados em uma verificação, tratando-se de mensurar para comprovar medidas, de maneira precisa e confiável, a análise estatística.

#### 3.3.1 Equacionamento da constante cinética (K) a partir do Balanço de Massa

Após a investigação de dados operacionais coletados, o próximo passo consistiu na aplicação de conhecimentos sobre cinética química para elaborar o equacionamento da constante cinética (K) para reatores em batelada a partir da sentença matemática do balanço de massa, dada pela seguinte expressão:

$$ACÚMULO = ENTRADA - SAÍDA \pm REAÇÃO \quad (5)$$

$$\frac{dm}{dt} = m_E - m_S \pm m_R \quad (6)$$

$\frac{dm}{dt}$ : Acúmulo de massa em função do tempo ( $\text{kg} \cdot d^{-1}$ );

$m_E$ : Fluxo mássico de entrada ( $\text{kg} \cdot d^{-1}$ );

$m_S$ : Fluxo de mássico de saída ( $\text{kg} \cdot d^{-1}$ );

$m_R$ : Fluxo mássico que reage no interior do reator ( $\text{kg} \cdot d^{-1}$ ).

No reator em batelada ideal, a composição é variável com o tempo e uniforme em qualquer posição dentro do reator. Com fluxos de entrada e saída ausentes, os reagentes são colocados em contato no tanque e deixados sob agitação, para assim sobrevir a reação. A

partir da Equação (6), colocando o acúmulo de massa em função do tempo, a expressão do balanço de massa, tem-se a seguinte expressão:

$$REAÇÃO = ACÚMULO \quad (7)$$

$$\therefore \frac{dm}{dt} = m_R = \int_{\Delta V} r dV \quad (8)$$

V: Volume de controle dentro do reator ( $m^3$ );

$\Delta V$ : Unidade infinitesimal do volume de matéria no reator ( $m^3$ );

r: Velocidade de reação ( $m \cdot h^{-1}$ ).

Levando em consideração o volume constante no interior do reator e que opera com reação ocorrendo em todo seu volume (V) (logo  $\Delta V = V - 0$ ), a equação (8) pode ser reescrita como:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(C * V)}{dt} = V * \frac{dC}{dt} \quad (9)$$

$$\therefore m_R = \int_0^V r dV = r * V \quad (10)$$

C: Concentração de matéria orgânica expressa em DQO ( $mg \cdot L^{-1}$ ).

Igualando as equações (9) e (10) e cancelando os termos em comum:

$$\cancel{V} * \frac{dC}{dt} = r * \cancel{V} \quad (11)$$

$$\frac{dC}{dt} = r \quad (12)$$

Como os reatores foram trabalhados com cinética de primeira ordem ( $n = 1$ ) para a conversão de matéria orgânica, tendo em vista as baixas concentrações de substrato em

efluentes de natureza doméstica, não se tornando um limitador da reação, temos a fórmula a seguir, baseando-se na equação (1):

$$r = \pm kC^1 \quad (13)$$

$$\therefore \frac{dC}{dt} = \pm kC \quad (14)$$

$k$ : Constante de reação ( $h^{-1}$ )

Isolando a variação de concentração de matéria ( $dC$ ), e assumindo uma perda/decomposição no reator:

$$dC = -kCdt \quad (15)$$

Para  $t = 0$  quando a concentração é  $C_0$  e  $t = t$  quando a concentração é  $C(t)$ :

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = \int_0^t -kdt \quad (16)$$

$$\therefore \ln C - \ln C_0 = -kt \quad (17)$$

$$\therefore \ln \left( \frac{C}{C_0} \right) = -kt \quad (18)$$

Por fim, calculou-se a constante de reação ( $k$ ) em reatores em batelada que não operam com recirculação, isolando-a da seguinte maneira:

$$k = -\frac{1}{t} * \ln \left( \frac{C}{C_0} \right) \quad (19)$$

$k$ : Constante de reação ( $h^{-1}$ );

$t$ : Tempo de reação ( $h$ );

$C$ : Concentração no efluente tratado ( $mg.L^{-1}$ );

$C_0$ : Concentração no afluente ( $mg.L^{-1}$ ).

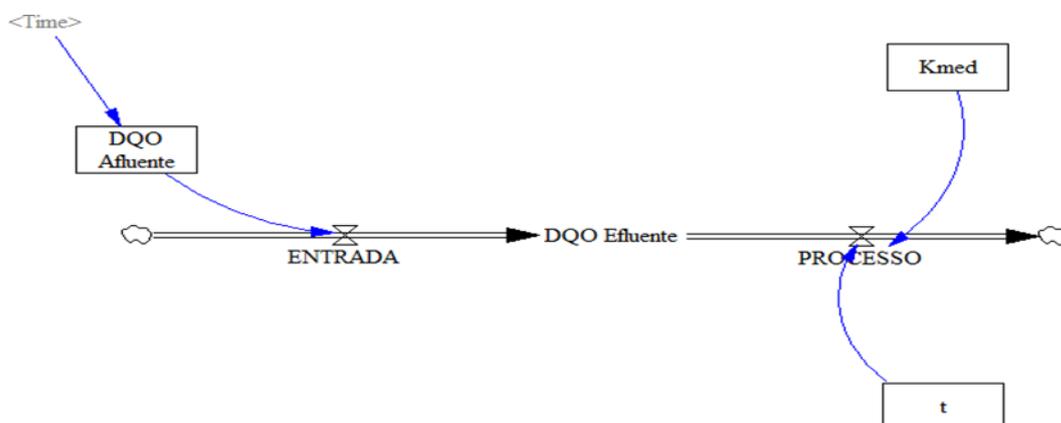
A partir da equação (19), foram calculadas as constantes de reação de cada amostra desenvolvidas em laboratório, de acordo com proposições tanto de Silva (2020) quanto da Silva (2019). Em seguida, foram utilizados dados da Demanda Química de Oxigênio – (DQO) afluente e efluente tratado de cada experimento, sendo a de entrada para cada amostra e a de saída a sua média aritmética, por se tratar de uma simulação.

### 3.3.2 Simulando um reator em batelada utilizando o Vensim PLE®

Após a obtenção dos valores das constantes cinéticas de reação, levando-se em consideração os dados da operação dos reatores avaliados, fez-se a sua média ( $K_{med}$ ), com o intuito de inseri-lo no software de simulação contínua Vensim PLE®. A interface do software fornece uma maneira simples de como construir modelos de reatores a partir de diagramas de causalidades ou ações e taxas.

Partindo da introdução ao software de dinâmica de sistemas, nele foram inseridos: (i) uma taxa de entrada – onde foram programados dois comandos para o seu funcionamento: um foi a variável fantasma  $\langle Time \rangle$  (para que possam ser inseridos os valores de DQO de entrada em determinado espaço de tempo); e o outro o estoque de DQO afluente (processo onde são inseridos os valores obtidos em laboratório para a plotagem de gráficos de DQO); (ii) uma taxa de processo – ponto onde são recebidos dois estoques: o valor médio da constante de reação ( $K_{med}$ ), conforme dados extraídos de laboratório, e o tempo de reação ( $t$ ), por meio da expressão  $1 + (t * K)$ ; (iii) A taxa intermediária DQO efluente – ponto em que, de forma automática, retorna a relação entre as taxas de entrada e de processo. O procedimento de simulação pode ser vista na figura 01.

**Figura 01:** Esquema de reator em batelada utilizando o software Vensim PLE®.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Logo após a simulação do comportamento dos sistemas, foi feito o estudo comparativo na forma de plotagem de gráficos de DQO efluente, e com isso verificar, tanto de forma analítica quanto matemática (eficiência de reatores real e simulado mais o coeficiente de correlação Pearson), a validação dessa ferramenta para análise cinética dos reatores operados em diferentes regimes de escoamento.

### 3.3.3 Eficiência de reatores descontínuos

Segundo Wendling *et al.* (2017), para a eficiência de remoção de matéria orgânica do reator em batelada, calcula-se utilizando a fórmula abaixo:

$$E(\%) = \frac{C_o - C}{C_o} * 100 \quad (20)$$

Com relação aos parâmetros de sua eficiência, para determinar o nível de remoção do reator, faz-se a análise comparativa quantitativa por meio de valores de outros estudos de pesquisa de mesmo tipo de operação, já que não tem um valor regulamentado pela resolução 357/2005 do CONAMA.

### 3.3.4 Similaridade de gráficos utilizando correlação Pearson ( $\rho$ )

Em termos de análise matemática, para aprimorar a validação do software Vensim PLE<sup>®</sup> no quesito remoção de matéria orgânica, foi utilizado uma medição estatística denominada *coeficiente de correlação Pearson* ( $\rho$ ) em que a mesma tem como finalidade apresentar o grau de relação entre duas variáveis distintas, demonstrando assim o seu teor de similaridade ou associação entre ambas, seja em variações de característica crescente ou decrescente. Para Filho e Júnior (2009), o coeficiente de correlação Pearson ( $\rho$ ) possui o parâmetro de -1 a 1, significando que quanto mais próximo de -1, ambas as variáveis possuem relações lineares inversamente proporcionais, ou seja, quando uma aumenta a outra diminui e vice versa, no entanto, quanto mais próximo de 1, as variáveis em análise possuem linearidades diretamente proporcionais, em outros termos, apresentam comportamentos semelhantes de aumento e decremento entre elas. Já o  $\rho = 0$  expressa que esta e aquela

variável em estudo não dependem linearmente uma da outra, e que há uma possibilidade de uma dependência não linear, cabendo assim uma investigação por outros meios estatísticos para este caso específico.

Com relação a classificação de similaridade entre as variáveis, como valores extremos (0 ou 1) dificilmente são encontrados na prática é importante discutir como os pesquisadores podem interpretar a magnitude dos coeficientes. Para Cohen (1988), valores entre 0,10 e 0,29 podem ser considerados pequenos; escores entre 0,30 e 0,49 podem ser considerados como médios; e valores entre 0,50 e 1 podem ser interpretados como grandes. Ademais, Dancey e Reidy (2005) apontam para uma classificação ligeiramente diferente:  $\rho = 0,10$  até 0,30 (fraco);  $\rho = 0,40$  até 0,6 (moderado);  $\rho = 0,70$  até 1 (forte).

Para a realização dos cálculos, foi utilizado o programa Windows Excel, por meio do código de comando inserido na cédula chamado “CORREL”, em que selecionando os valores de duas matrizes dos dados operacionais de reatores descontínuos, sendo uma matriz com os valores em laboratório e outra com dados simulados pelo Vensim PLE®, consegue chegar a um resultado fixo, para que o comparativo possa ser classificado de acordo com os parâmetros de similaridade citados anteriormente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos modelos analisados, observou-se o comportamento dos dados operacionais obtidos de reatores descontínuos, tanto na simulação quanto no laboratório. O parâmetro analisado foi a demanda química de oxigênio (DQO) efluente em ambos os casos, assim como a plotagem dos seus respectivos gráficos, tendo como foco a comparação de resultados. De forma análoga ao equacionamento, os resultados dos cálculos desenvolvidos a partir da equação (15), assim como a simulação no Software Vensim PLE®, foram feitos de maneira distintas, onde os reatores em batelada foram analisados e comparados com os demais de outras naturezas.

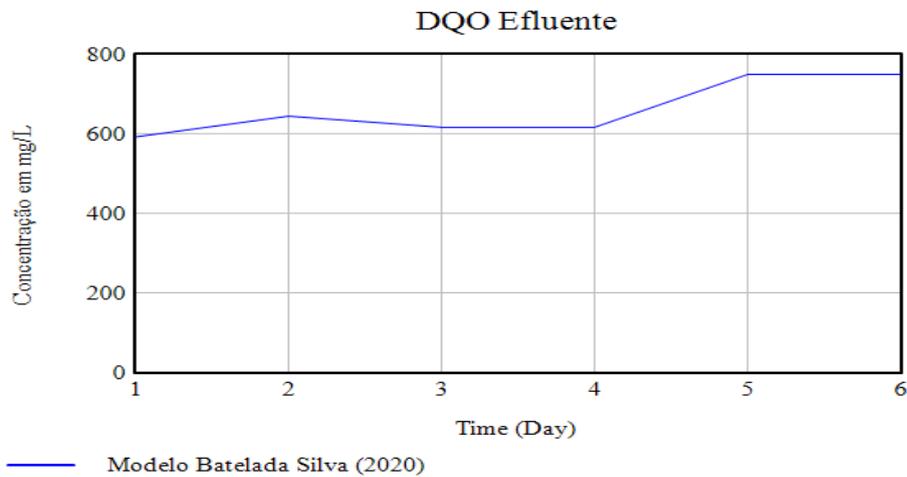
### 4.1 Analisando o reator descontínuo do Silva (2020)

Partindo da análise cinética de reatores descontínuos, foram utilizados dados da demanda química de oxigênio (DQO) afluyente e efluente obtidos em laboratório por Silva (2020), em que por sua vez trabalhou com o reator em um período de 24 horas de reação, onde foram apresentados valores em média de  $1283 \pm 160 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $432,67 \pm 61,6 \text{ mg.L}^{-1}$ , respectivamente. Nesse caso específico, para obtenção das constantes de reação (K), foi empregado o valor médio de saída junto com os valores de entrada de cada amostra, seguindo a fórmula da constante em reatores descontínuos (Equação 19). Após as constantes de reação encontradas em cada amostra, fez-se a média aritmética de seus dados operacionais, encontrando a constante média  $K_{med} = 0,0405 \text{ h}^{-1}$ .

Com o  $K_{med}$  revelado, houve a inserção do seu valor dentro do seu estoque, colocando o seu tipo como “constant” e, em seguida, checkou-se a sua sintaxe para a validação do estoque criado. Estabelecendo o tempo de reação de 24 horas no seu estoque produzido, juntamente com a fixação de dados de DQO afluyente em laboratório em sua caixa de armazenagem de dados, a simulação foi reproduzida com sucesso e assim um gráfico inédito foi gerado, para que a análise comparativa fosse feita posteriormente.

No gráfico 03 a seguir, mostra de forma clara a plotagem do gráfico de DQO efluente utilizando o software Vensim PLE®, com o eixo horizontal representando o número da amostra analisada, denominado de “Time (Day)”, e no eixo vertical a concentração da quantidade de DQO presente no efluente do reator, dada em miligramas por litro (mg/L):

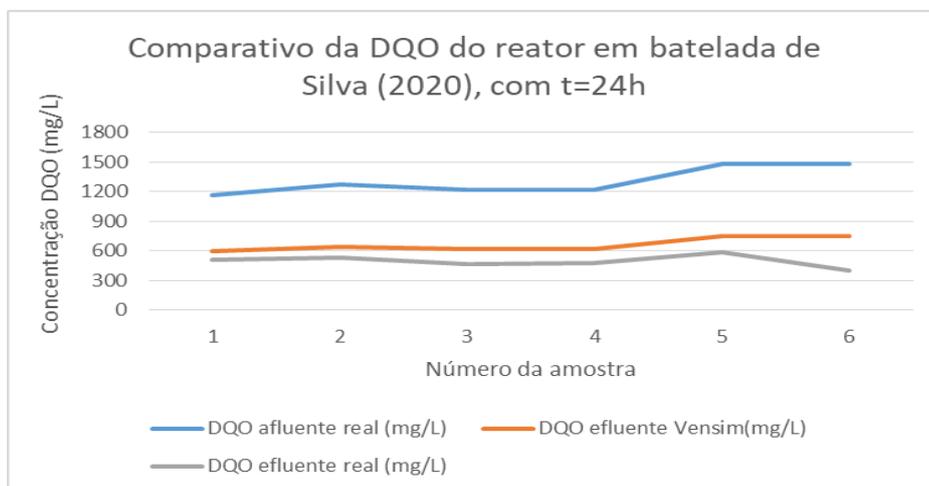
**Gráfico 03:** Gráfico da DQO efluente do modelo batelada de SILVA (2020) direto do sistema Vensim PLE®.



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2022).

Unindo os dados em laboratório com os dados obtidos através do Vensim PLE®, foi desenvolvido um novo gráfico plotado em Excel (Gráfico 04), mostrando o comportamento das linhas de DQO afluente, DQO efluente real e DQO efluente simulado, tudo isso com a finalidade de realizar o comparativo de forma analítica, observando a olho nu traços de similaridade entre ambas as linhas, identificando se elas, em cada amostra, apresentam diretamente ou inversamente proporcionais entre si.

**Gráfico 04:** Gráfico comparativo da DQO do reator em batelada de SILVA (2020) com  $t=24h$ .



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2022).

Visualizando o gráfico 04, percebe-se que o comportamento entre as curvas de efluente tratado medido em laboratório e as curvas simuladas com auxílio do Vensim PLE® demonstram um alto teor de similaridade. Matematicamente, através do coeficiente de correlação Pearson o valor encontrado foi de ( $\rho = 0,894$ ), apresentando assim uma correlação positiva forte. Portanto, pode-se afirmar que o grau de variação das medições de DQO atende de maneira satisfatória.

Já as suas eficiências, a partir dos resultados encontrados por intermédio da equação (20), enquanto em laboratório foi em torno de 60%, o Vensim PLE® teve em média 53%. Apesar do reator descontínuo real ser mais eficiente do que o simulado, ambos tiveram remoção satisfatória, em comparação com demais estudos sobre esta temática específica, como consta no quadro 04:

**Quadro 04:** Estudo de outros autores relacionados a eficiência de remoção de DQO em reatores descontínuos.

<b>Autor(es)</b>	<b>Contexto</b>	<b>Eficiência</b>
<b>Santos <i>et al.</i> (2017)</b>	Influência da alimentação escalonada na biodegradação de corante têxtil por fungos imobilizados em reator em bateladas sequenciais.	Caso 1: 46% Caso 2: 55% Caso 3: 60%
<b>Duarte <i>et al.</i> (2021)</b>	Estudo do tratamento de efluente de celulose kraft utilizando reator sequencial em batelada (RSB) com meio suporte esponjoso.	Caso 1: 53% Caso 2: 34,5%
<b>Ruiz <i>et al.</i> (2022)</b>	Avaliação da eficiência de remoção de DQO, nitrogênio e fósforo no cotratamento de esgoto com lixiviado em sistema de lodos ativados.	Caso 1: 45% Caso 2: 75% Caso 3: 42% Caso 4: 37%

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2022)

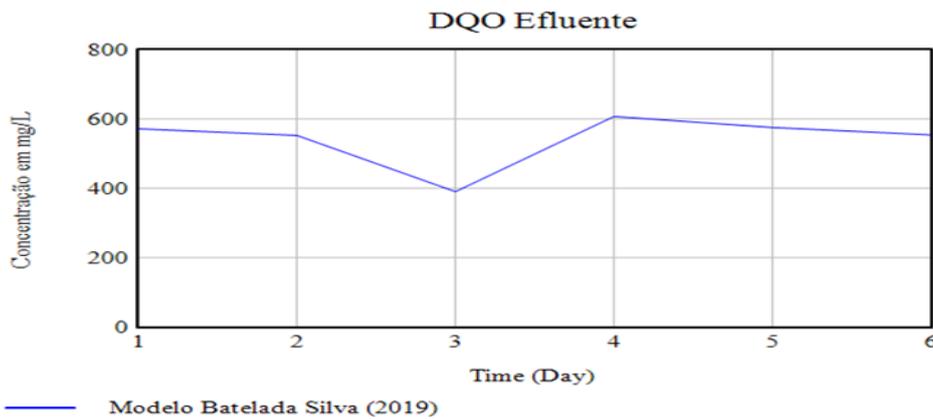
De acordo com o quadro acima (quadro 04), percebe-se que a eficiência da remoção de DQO entre os três autores citados estão no intervalo de 35% a 75%, onde cada um conclui que seus resultados foram convincentes, e que demonstram alternativas bastante eficazes para cada tipo de situação.

## 4.2 Analisando o reator descontínuo da Silva (2019)

Reproduzindo a metodologia feita com o reator anterior, desta vez com o tempo de reação trabalhado de 16 horas, os valores médios da DQO afluente e efluente ficaram, respectivamente, em torno de  $1120 \pm 142 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $400 \pm 63,5 \text{ mg.L}^{-1}$ . Utilizando a equação (15), o seu  $K_{med}$  foi de  $0,045 \text{ h}^{-1}$ .

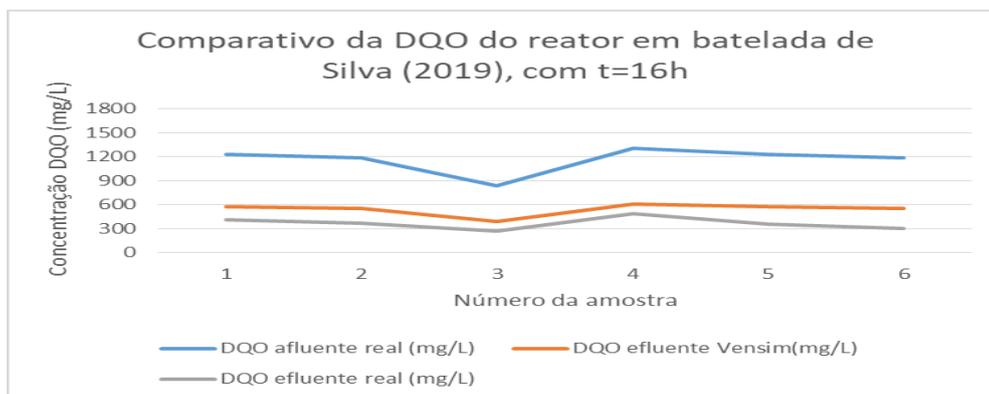
Com o mesmo esquema de inserção de dados no Vensim PLE<sup>®</sup>, houve a plotagem de representação de dados, como demonstrados nos gráficos 05 e 06:

**Gráfico 05:** Gráfico da DQO efluente do reator em batelada de SILVA (2019) direto do sistema Vensim PLE<sup>®</sup>.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

**Gráfico 06:** Gráfico comparativo da DQO do reator em batelada de SILVA (2019) com  $t=16\text{h}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Em concordância com o gráfico comparativo (gráfico 06), como a forma gráfica simulada está bem parecida com a real, a correlação entre os dois gráficos foi ( $\rho = 0,754$ ), significando um alto grau de semelhança entre si. Neste instante, tendo em foco as suas eficiências, os seus valores, real e simulado, possuem respectivamente: 62% e 56%. Dessas porcentagens encontradas, pode-se fazer a mesma conclusão do item anterior, em que o laboratório obteve a maior eficiência, porém ambos tiveram resultados satisfatórios, se comparados com pesquisas de autores citados no quadro 04.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A simulação do comportamento da remoção de matéria orgânica em termos de demanda química de oxigênio é uma questão de alto nível de complexidade por conta do envolvimento de muitas variáveis de difícil controle, como interferência de rotas metabólicas, cinética reacional e fatores hidrodinâmicos por exemplo. Tudo isso torna-se algo praticamente impossível para elaborar formulações de um modelo cinético que inclua todos os aspectos e detalhes envolvidos. Todavia, faz-se necessário desenvolver métodos mais simplificados, a fim de tornar o modelo mais aplicável.

Já no que se concerne aos reatores em batelada em si, embora a sua produção em grande escala possua uma dificuldade elevada, incluindo também o alto custo de mão de obra para a sua higienização e qualidade do produto instável, ainda assim conta com o menor investimento de capital comparado com reatores contínuos, quando a sua capacidade de conversão for baixa, além de ser fácil de limpar. Não é à toa que a principal utilização dos reatores descontínuos são para operações em escalas reduzidas, pois eles tem como finalidade a testagem de processos inéditos que foram desenvolvidas de maneira incompleta.

A idealização de escoamento de reatores é bastante vantajosa pelo simples fato de simplificar o equacionamento matemático para a determinação das constantes cinéticas. Apesar dos reatores reais não apresentem escoamento ideal, o modelo ideal sempre será uma alternativa de referência para análise de dados operacionais, seja na projeção, simulação ou aumento na escala de reatores reais.

As equações encontradas com auxílio dos balanços de massa realizados para os reatores estudados possibilitaram a estimativa e comparação dos valores das constantes cinéticas aparentes para remoção da matéria orgânica, gerando dados necessários para alimentar o programa de simulação (Vensim PLE®). Diante dos resultados obtidos anteriormente neste relatório, percebe-se o quão importante é a utilização do software de modelagem para sistemas dinâmicos para simular um reator cinético ideal, pois além de apresentar uma eficiência entre 53 e 56% com relação aos dados de Demanda Química de Oxigênio efluente (DQO Efluente), o seu comportamento gráfico é bem semelhante comparado com o obtido em laboratório de saneamento. Isso mostra que essa mesma ferramenta tem-se uma grande aplicabilidade quando se trata da técnica de simulação computacional, já que esse mecanismo tem como vantagem a economia mais viável de recursos e tempo.

Por meio do coeficiente de correlação Pearson, pode-se observar que, em ambos os casos, tanto o fator de similaridade entre a linha da concentração de DQO efluente gerado pelo Vensim PLE® e a linha do Silva (2020) quanto entre a linha simulada e a da Silva (2019), demonstram correlação positiva ( $\rho \geq 0,70$ ) entre as curvas simuladas e os resultados obtidos em laboratório, comprovando assim a validação do software.

Para modelação e análise de biorreatores para tratamento de águas residuárias são necessários dois conhecimentos fundamentais: o modelo hidrodinâmico do sistema e o modelo cinético com as constantes determinadas. Nesse sentido, a alteração da cinética de degradação pode ser algo vantajoso para o coeficiente de correlação, principalmente nas situações de reatores tratando efluentes com cargas orgânicas elevadas, sendo esta uma sugestão interessante para investigações futuras.

## REFERÊNCIAS

ANGELUCCI, Camilo Andrea; GODOI, Glauber Silva. **Cinética química**. São Cristóvão: Universidade, 2010.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição** da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidente da República, [2016]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm). Acesso em 18 Mai. 2022.

BRASIL. **Diretrizes nacionais para o saneamento básico**. Brasília, DF: Presidente da República (2007). Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2011.445%2C%20DE%205%20DE%20JANEIRO%20DE%202007.&text=Estabelece%20diretrizes%20nacionais%20para%20o,1978%3B%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2011.445%2C%20DE%205%20DE%20JANEIRO%20DE%202007.&text=Estabelece%20diretrizes%20nacionais%20para%20o,1978%3B%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias). Acesso em: 22 Mai. 2022.

BRASIL. Ministério da saúde. **Programa Saneamento Básico**. Série C. Projetos, Programas e Relatórios, Nº 57. Brasília, 2002.

BRASIL. **Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento**. Diagnóstico dos serviços de Água e Esgoto - 2021. Brasília: SNIS, 2021. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos>>. Acesso em: 20 Maio 2022.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. 4ª edição. São Paulo: Elsevier Brasil, 2014. 320 p.

COHEN, Jacob. (1988), *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, NJ, Erlbaum.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 005, 15 de Junho de 1998. Ministério do Meio Ambiente. \_\_\_\_\_, 1998.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, 17 de Março de 2005. Ministério do Meio Ambiente. \_\_\_\_\_, 2005

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, 29 de Agosto de 2006. Ministério do Meio Ambiente. \_\_\_\_\_, 2006.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, 13 de Maio de 2011. Ministério do Meio Ambiente. \_\_\_\_\_, 2011.

DA CUNHA SOARES, Tamires et al. Perfil da água para o consumo humano e notificação de doenças em uma macrorregião do Piauí, Brasil. **Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal**, v. 12, n. 2, p. 205-215, 2018.

DANCEY, Christine & REIDY, John. (2006). **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows**. Porto Alegre, Artmed.

DE ALENCAR MACHADO, Carla Rênes; SOUSA, Dayse Pereira Barbosa; DA SILVA, Gisele Cantalice Salomão. **A busca por soluções para a poluição hídrica: um estudo de caso sobre tratamento de efluentes**. v. 8, n. 2, p. 14115-14122, 2022.

DE COSTA, H. L. **Dinâmica de Sistemas I parte: Vensim-PLE**. Disponível em: <<https://vensim.com/portuguese-documentation/>>. Acesso em: 27 Abr. 2022.

DE MIRANDA, D. L.; MENDONÇA, A. T.; de Melo, M. C.; de Melo, E. D. Educação Ambiental a partir da Agenda 2030: experiências da conscientização e do uso racional da água na educação municipal de Varginha (MG). **Revista Brasileira de Educação Ambiental** (RevBEA), v. 16, n. 2, p. 174-190, 2021.

DE OLIVEIRA CARNEIRO, Marta Camila Mendes et al. A gestão do saneamento no Brasil e sua relação com a gestão de recursos hídricos. **INOVAE-Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation** (ISSN 2357-7797), v. 6, p. 101-116, 2018.

DE OLIVEIRA, Celmar Corrêa; BINKOWSKI, Patrícia; ALBRECHT, Cristina A. M.; SILVA, José Piethro S. da Silva. Cidades e Sustentabilidade. **Os desafios para conciliar equilíbrio ecológico e bem-estar social**. Porto Alegre – RS: UERGS, 2021.

DOS SANTOS, Gustavo Evangelista *et al.* Influência da alimentação escalonada na biodegradação de corante têxtil por fungos imobilizados em reator em bateladas sequenciais. **Revista DAE**, núm. 215, vol. 67, 2019. Disponível em: <[http://revistadae.com.br/artigos/artigo\\_edicao\\_215\\_n\\_1763.pdf](http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_215_n_1763.pdf)>. Acesso em: 23 Mai. 2022. Doi: 10.4322/dae.2019.005.

DUARTE, Igor. Estudo de caso: aplicação de nanotecnologia em uma estação de tratamento de efluentes domésticos em São Miguel dos Milagres–Alagoas. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS**, v. 7, n. 1, p. 51-51, 2021.

DUARTE, Julie Christine; PEITZ, Camila; XAVIER, Claudia Regina. II-258 - Estudo do tratamento de efluente de celulose Kraft utilizando Reator Sequencial em Batelada (RSB) com meio suporte esponjoso. Artigo científico publicado no XIV SIBESA, Ponta Grossa-PR. Disponível em: <<https://abesnacional.com.br/XP/XP-EasyArtigos/Site/Uploads/Evento45/TrabalhosCompletoPDF/II-258.pdf>>. Acesso em: 30 Abr 2022.

FERNANDES, Otavio Felipe. **Modelação de sistemas de tratamento biológico com lamas ativadas para águas residuais urbanas**. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2021. Dissertação de Mestrado.

FILHO, D. B. F; JÚNIOR, J. A. D. S. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, Vol. 18, n. 1, 2009.

ONU - Organização das Nações Unidas. Resolução A/RES/64/292: Direito humano à água e ao saneamento. Disponível em: <[https://www.un.org/waterforlifedecade/pdf/human\\_right\\_to\\_water\\_and\\_sanitation\\_media\\_brief\\_por.pdf](https://www.un.org/waterforlifedecade/pdf/human_right_to_water_and_sanitation_media_brief_por.pdf)>. Acesso em: 17 Abr. 2022.

PIRES, João Felipe de Moraes. MARTINS, Daiane Micaelly. COELHO, Filipe Alves. Construção de reatores contínuos: Tanque agitado e Reator Tubular para avaliação de desempenho na reação de saponificação do Acetato de Etila. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 04, Ed. 10, Vol. 02, pp. 176-200. Outubro de 2019. ISSN: 2448-0959, Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-quimica/construcao-de-reatores>>. Acesso em: 23 Maio 2022.

PROETTI, Sidney. As pesquisas qualitativa e quantitativa como métodos de investigação científica: Um estudo comparativo e objetivo. **Revista Lumen-ISSN: 2447-8717**, v. 2, n. 4, 2018. Disponível em:

<<http://www.periodicos.unifai.edu.br/index.php/lumen/article/view/60>>. Acesso em: 11 Mai. 2022. Doi: <<http://dx.doi.org/10.32459/revistalumen.v2i4.60>>.

RISTIC, O.; IRICANIN, B. D.; MIJAILOVIC, V. **Dynamic Modeling and Simulation of Power Transformer Maintenance Costs**. Serbian journal of electrical engineering. Vol. 13, No. 2, June 2016, 285-299.

ROLLEMBERG, Silvio Luiz de Souza et al. Tecnologia de lodo granular aeróbio no tratamento de esgoto doméstico: oportunidades e desafios. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 25, p. 439-449, 2020. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/wVgrNFYsy6K4GYf3FWG8FSS/?stop=previous&lang=pt&format=html>>. Acesso em: 14 Jun. 2022. Doi: <<https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020190302>>.

RUIZ, Gabriela Soares et al. Avaliação da eficiência de remoção de DQO, nitrogênio e fósforo no cotratamento de esgoto com lixiviado em sistema de lodos ativados. **Holos Environment**, v. 22, n. 1, p. 1-17, 2022.

SÁ, Franklin Gama de. **Análise cinética de um reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo com recirculação da fase líquida tratando esgoto sanitário**. 2019. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Unidade Delmiro Gouveia-Campus do Sertão, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2019.

SÃO PAULO. **Política Estadual de Saneamento**. São Paulo, 1992.

SARTI, Arnaldo; ZAIAT, Marcelo; FORESTI, Eugenio. Desempenho de reatores anaeróbios operados em bateladas seqüenciais (escala piloto) no tratamento de esgoto sanitário. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina**, v. 26, n. 2, 2005.

SCHMAL, Martin. **Cinética e Reatores: Aplicação a Engenharia Química**. 3ª Edição. Editora Synergia. 2017.

SILVA, Larissa de Freitas. **Produção e caracterização das lammas de um sistema de tratamento de águas residuais: modelação e simulação**. 2021. Tese de Doutorado. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/24774>>. Acesso em: 23 Mai. 2022. Doi: <<http://hdl.handle.net/10198/24774>>.

SILVA, R. K. S. S. **Análise da eficiência do tratamento de efluente advindo de processo industrial submetido a diferentes tempos de reação em reator anaeróbio operado no regime de batelada**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2019.

SILVA, S. V. **Investigação de diferentes configurações de reatores, aliada a características de escoamento e formas de imobilização da biomassa, como alternativa biológica para remediação do esgoto sanitário do sertão Alagoano**. Relatório Final PIBIC 2019/2020. Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2020.

SOUZA, Tharick Almeida Alvanham. **Desenvolvimento de um programa para dimensionamento de estação de tratamento de esgoto para fins didáticos**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2021.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Princípios básicos do tratamento de esgotos**. 1 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. 1996. 211 p. v.2.

WENDLING, Ana Claudia; JENZURA, Nathanna Tessari; BARANA, Ana Cláudia. **II-143- Remoção de DQO e nitrogênio total de esgoto sanitário combinado com efluente de RALF em reator de leito estruturado com aeração intermitente.** Artigo científico publicado no XIV SIBESA, Ponta Grossa-PR. Disponível em: <<https://abesnacional.com.br/XP/XP-EasyArtigos/Site/Uploads/Evento40/TrabalhosCompletosPDF/II-143.pdf>>. Acesso em: 30 Abr 2022.