

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS
Curso de Graduação em Farmácia-Bioquímica

**Revisão sistemática de estratégias anaeróbias e aeróbias para
o tratamento secundário de efluentes na indústria brasileira
de laticínios.**

Guilherme Afonso Rocha Lemos

Trabalho de Conclusão do Curso de
Farmácia-Bioquímica da Faculdade de
Ciências Farmacêuticas da Universidade de
São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Mauri Sergio Alves
Palma

São Paulo

2023

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. OBJETIVOS	8
3. MATERIAL E MÉTODOS	9
3.1. Estratégias de pesquisa	9
3.2. Critérios de inclusão	10
3.3. Critérios de exclusão	10
3.4. Coleta e análise dos dados	10
3.4.1 Revisão Sistemática	10
3.4.2. Metanálise	11
4. RESULTADOS	12
4.1 Revisão sistemática	12
4.2 Análise dos resultados de eficiência	13
5. DISCUSSÃO	24
5.1 Influência dos processos na eficiência de remoção de DQO	24
5.2 Variáveis que afetam o desempenho do tratamento biológico	26
5.3 Eficiência de remoção em escala laboratorial e industrial.	28
5.4 Eficiência observada e resolução CONAMA	28
5.5 Recursos operacionais e financeiros para tratamento	29
6. CONCLUSÃO	31
7. REFERÊNCIAS	33

RESUMO

LEMOS, G.R. **Revisão sistemática de estratégias anaeróbias e aeróbias para o tratamento secundário de efluentes na indústria brasileira de laticínios.** 2023. no. f. Trabalho de Conclusão de Curso de Farmácia-Bioquímica – Faculdade de Ciências Farmacêuticas – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Palavras-chave: Laticínios, Efluente, Aeróbio, Anaeróbio.

Tendo em vista o crescimento da indústria de laticínios no Brasil e no mundo, o tratamento de efluentes resultantes destes processos industriais é um tópico que tem ganhado cada vez mais destaque, visto que os rejeitos resultantes do processo são ricos em material biológico, resultando em efluentes com alta demanda bioquímica e química de oxigênio. Nos últimos anos, para o tratamento secundário, desses efluentes, tem sido preferível o bioprocessamento através de estratégias aeróbias e anaeróbias, com diferentes vantagens, desvantagens e custos associados, a discussão sobre o método preferível para tratamento destes rejeitos deve levar em conta fatores como custo e eficiência em remoção de poluentes para adequação às legislações vigentes.

Visando determinar o método de tratamento mais eficiente, bem como os fatores que afetam os tratamentos, coletou-se, através dos critérios de busca de palavras chave dentro das bases de dados *Web of Science*, *Scopus*, *PubMed* e *Google Scholar*, os dados referentes à eficiência de estratégias aeróbias, anaeróbias e facultativas (aeróbia/anaeróbia) em remoção de contaminantes de efluentes das indústrias de laticínios, bem como os parâmetros físico-químicos do processo, como pH, temperatura e carga orgânica. Através da análise com o teste ANOVA *de fator único e de múltiplos fatores*, foi possível estudar a significância da variação das médias e correlação entre parâmetros físico-químicos e eficiência do processo. O teste de *Tukey* também foi realizado para comparação entre as estratégias estudadas.

Foram identificados 16 estudos em âmbito nacional e internacional que avaliaram o desempenho do tratamento secundário de efluentes de indústrias de laticínios dentro dos critérios de elegibilidade definidos nesta análise, os dados de eficiência obtidos com os

estudos demonstraram que a eficiência dos métodos anaeróbios para remoção da demanda química de oxigênio foi significativamente menor que a eficiência apresentada por métodos aeróbios (94,6% e 67,4%, $p < 0,01$) e facultativos (96,2% e 67,4%, $p < 0,01$), sendo a diferença também significativa para a remoção de nitrogênio e demanda bioquímica de oxigênio, porém não significativa para a remoção de sólidos suspensos totais. Quanto à correlação entre os parâmetros físico-químicos e eficiência do processo, foi observado que os métodos anaeróbios foram significativamente mais susceptíveis a variações de parâmetros físico-químicos, assim como o demonstrado na literatura geral. Em comparação direta dos métodos mais utilizados pelos estudos para o tratamento de resíduos, o uso de reatores batelada sequenciais (Sequencing batch reactor-SBR), aeróbios e facultativos, apresentaram melhor eficiência na remoção de conteúdo geral oxidável em comparação ao uso dos reatores anaeróbios de manta de lodo ascendente (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket-UASB*) (97,4% e 75,0%; 96,2% e 75,0%, $p < 0,05$, respectivamente).

De acordo com os resultados obtidos e a legislação vigente no país, observou-se que grande parte dos métodos apresentaram valores dentro das normas, contudo, alguns estudos que utilizaram o tratamento anaeróbio apresentaram qualidade do efluente inferior ao definido pela legislação, demonstrando a importância de tratamentos posteriores. Na análise de viabilidade econômica foi analisada a relação custo/benefício dos métodos em função da carga orgânica do efluente. Devido à elevada carga orgânica dos efluentes da indústria de laticínios, a literatura corrobora com os resultados obtidos nesta revisão, indicando que métodos facultativos com tratamento anaeróbio, seguido de aeróbio, podem apresentar melhor relação custo/benefício e eficiência.

1. INTRODUÇÃO

O leite é uma matéria prima muito importante para a produção dos mais diversos produtos consumidos diariamente por todo o mundo, estando entre os 5 produtos mundialmente mais comercializados tanto em valor quanto em volume (GDP, 2017).

No Brasil, estima-se que o consumo de leite seja de 166,4 L/habitante/ano (EMBRAPA, 2019). Tem-se visto também um contínuo aumento no consumo de leite, mais que dobrando o consumo entre 2003 e 2017 (EMBRAPA, 2019).

Tendo em vista o alto consumo de leite no cenário brasileiro, bem como a capacidade e recursos naturais do país para a produção de leite, a indústria de laticínios vem se expandindo dentro do cenário industrial brasileiro, sendo responsável pela produção de uma vasta gama de produtos.

As indústrias responsáveis pelo processamento de leite estão dentro de um segmento economicamente e socialmente importante para o país, mas também podem ser responsáveis por grandes impactos ambientais, já que podem contribuir significativamente com a poluição hídrica, quando lançam seus efluentes sem o tratamento adequado (Gonçalves, 2017). A indústria de laticínios tem como característica a produção de efluentes de elevada carga orgânica, compostos por resíduos de leite e partículas sólidas dispersas, decorrentes principalmente do processo de limpeza dos tanques e tubulações, sendo estimados pelo menos 2,5 litros de efluente para cada litro de leite processado (Villa, 2006). A composição do efluente varia muito do laticínio produzido e atividades desenvolvidas; são características destes efluentes, alta carga de lipídios, carboidratos, proteínas, essências, detergentes e desinfetantes (ricos em fósforo e nitrogênio) (MACHADO et al, 2002).

A presença de elevada concentração de lipídios no efluente, causa vários problemas ambientais, devido à cinética de degradação lenta quando comparada à de proteínas e carboidratos, elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO). Quando lançado no ambiente aquático, reduz drasticamente a concentração de oxigênio dissolvido e coloca em risco o ecossistema aquático (BEGNINI, 2014; PEREIRA, 2018). Sendo necessário o tratamento do efluente de modo a reduzir os parâmetros de descarga, DBO e DQO, bem como a quantidade de ácidos graxos (AZBAR & YONAR, 2004).

Para controle da liberação de efluentes o Conselho Nacional do Meio Ambiente define

através de sua resolução Nº 430 DE 13/05/2011, que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente no corpo de água receptor, desde que obedeçam às seguintes condições e padrões:

a) pH entre 5 a 9;

b) Temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;

c) Materiais sedimentáveis até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;

d) Regime de lançamento com vazão máxima de até 1,5 vezes a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor, exceto nos casos permitidos pela autoridade competente;

e) Óleos vegetais e gorduras animais até 50 mg/L;

f) Ausência de materiais flutuantes;

g) Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5 dias a 20°C): remoção mínima de 60% de DBO sendo que este limite só poderá ser reduzido no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor;

De modo a evitar a presença de sólidos e partículas maiores durante o tratamento primário e secundário é feito um pré tratamento do efluente por gradeamento (BRITZ et al., 2008). O processo de tratamento primário é realizado para reduzir a quantidade geral de ácidos graxos por meio de decantação, filtração, floculação e flotação, visto que altos níveis de lipídios podem causar problemas no tratamento biológico, que por conta da baixa cinética de degradação podem levar à colmatação dos filtros em reatores (VIDAL et al., 2000).

No tratamento secundário, podem ser empregados tratamentos físico-químicos ou biológicos. No tratamento físico-químico são empregados compostos químicos que permitem o consumo e remoção dos sólidos, porém por conta do alto custo dos reagentes, e baixa eficiência, é preferível o tratamento biológico (CAMMAROTA, 2006). Dentre os processos usados para o tratamento biológico se destacam os processos aeróbios e anaeróbios.

Os processos anaeróbios vêm ganhando espaço por possuir algumas vantagens como ausência de custos com aeração, baixa produção de sólidos, produção de gás natural e tolerância a elevadas cargas orgânicas (MENDES et al., 2006).

No processo aeróbio é fundamental a introdução de oxigênio no efluente sendo tratado, para permitir a digestão aeróbia pelos microrganismos, recirculação do lodo e descarte de lodo excedente (VON SPERLING, 1997). O processo apresenta boa redução de matéria orgânica, boa resistência a choques de carga e flexibilidade operacional, porém a operação é mais cara e o lodo pode se depositar nos filtros (ROSA, 2004). Contudo, no processo aeróbio pode haver a formação de uma camada de ácidos graxos na superfície do tanque que afeta a troca gasosa necessária para o metabolismo e necessidade da retirada periódica do lodo para melhorar a clarificação do efluente final (MORAIS, 2005).

No processo anaeróbio por sua vez, o processo de digestão não necessita de oxigênio para metabolização, sendo importante que a carga orgânica aplicada seja elevada, para que a taxa de consumo de oxigênio seja superior à produção de biomassa, criando um ambiente anaeróbio (MORAIS, 2005). No caso específico da hidrólise anaeróbia de triacilgliceróis ocorre a formação de ácidos graxos de cadeia longa que dificultam o transporte de nutrientes (OMIL et al., 2003).

Apesar dos métodos existentes, ainda permanecem dúvidas quanto à eficiência de degradação de lipídios, os quais, em altas concentrações em reatores anaeróbios, podem provocar a flotação do lodo e formação de espuma (MENDES et al., 2006).

Atualmente existem diversas estratégias empregadas para o tratamento biológico secundário, porém existe uma escassez de estudos que avaliam as diferentes estratégias através de análise da eficiência e custo das instalações para tratamento de efluentes resultantes da indústria de laticínios no contexto do Brasil.

Deste modo, a fim de avaliar o impacto dos processos anaeróbios e aeróbios na adequação dos parâmetros de descarga aprovados pelo CONAMA, foi elaborada uma revisão sistemática avaliando as estratégias pontuadas e os resultados obtidos para cada estratégia.

2. OBJETIVOS

1) Realizar busca em bases de dados nacionais e internacionais por estudos que avaliaram o emprego de estratégias de tratamento secundário biológico para efluentes resultantes do processamento de laticínios;

2) Compilar os dados relativos à eficiência dos métodos empregados, bem como a estrutura utilizada para o tratamento secundário

3) Realizar tratamento estatístico dos dados de modo a analisar o impacto dos métodos na redução de material orgânico oxidável na efluente final através de:

3A) Comparação da eficiência de biorreatores aeróbios e anaeróbios nos valores finais de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e concentração de nitrogênio concentração sólidos suspensos.

3B) Verificação da influência da estratégia de tratamento no aumento da carga orgânica a ser tratada e no tempo de retenção hidráulica;

3C) Comparação das estratégias disponíveis para o tratamento de efluentes na indústria brasileira de laticínios levando em conta o custo/benefício e legislação brasileira.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Estratégias de pesquisa

A presente revisão sistemática segue as recomendações preconizadas pela *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (Page et al, 2021), que trata das boas práticas de revisão sistemática, análise de qualidade de evidência e força de recomendação.

Foram propostas estratégias de buscas para *Google Scholar*, *PubMed*, *Scopus*, *Scielo* e Repositório de artigos apresentados por Universidades Brasileiras.

Os descritores utilizados referem-se ao tratamento de efluentes da indústria de laticínios com estratégias baseadas em tratamento secundário por bioprocessamento aeróbio e anaeróbio. Esses termos foram combinados com os operadores booleanos (*AND* e/ou *OR*) sempre que necessário para as seguintes palavras chave (“Anaerobic” or “Aerobic” and (“Wastewater” and “Dairy processing”) or (“Efluentes” and “Indústria de Laticínios”) and “Aeróbio” or “Anaeróbio”) and (“Demanda Bioquímica de Oxigênio or “DBO”) and (Demanda Química de Oxigênio” or “DQO”) or (“Biochemical Oxygen Demand” or “BOD”) and (“Chemical Oxygen Demand” or “COD”). A pesquisa foi realizada em 07/2022 (sem uso de qualquer tipo de filtro).

Buscas manuais nas listas de referências dos estudos incluídos também foram realizadas para recuperar potenciais estudos não encontrados pelas bases de dados.

Para estimar a eficiência dos processos avaliados nos estudos foi utilizado o procedimento apresentado por Koetz (1996) para os valores de carga orgânica residual obtidos dos estudos, segundo Equação (1):

$$E=(C_0-C_f)/C_0 \times 100 \quad (1)$$

Onde E = eficiência de remoção (%), C₀ é a concentração da carga orgânica do efluente bruto (mg/L), C_f é a concentração da carga orgânica do efluente tratado (mg/L).

É também avaliada a concentração de sólidos totais e Nitrogênio antes e após o tratamento biológico para avaliação de eficiência dos biorreatores.

3.2. Critérios de inclusão

Como critérios de inclusão foram selecionados estudos nacionais e internacionais publicados entre 2000 e 2022, os estudos incluídos apresentaram dados relativos ao tratamento de efluentes da indústria de laticínios através de estratégias voltadas para a aplicação de tratamento secundário baseado em bioprocessamento aeróbio e anaeróbio em ambiente industrial ou laboratorial.

Os estudos contemplados devem obrigatoriamente registrar critérios como Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e concentração de ácidos graxos e nitrogênio antes e após o bioprocessamento.

Os artigos devem também descrever o método utilizado para desenvolvimento do processamento, bem como as condições do processo como carga orgânica e tempo de retenção do efluente.

Tendo em vista a diferença de concentração de resíduos entre os efluentes resultantes de diferentes processos industriais envolvidos na produção de uma vasta gama de laticínios, deve ser descrito as características gerais do efluente analisado como pH e temperatura.

3.3. Critérios de exclusão

A) Estudos que não descrevam o tratamento de efluentes resultantes do processamento de laticínios.

B) Estudos com estratégias que não contemplem o tratamento secundário por bioprocessamento aeróbio ou anaeróbio.

C) Estudos que não descrevem, com detalhes, as instalações e parâmetros de tratamento como carga orgânica, tempo de retenção hidráulica, temperatura e pH.

D) Estudos que não registraram critérios como Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) ou Demanda Química de Oxigênio (DQO) antes e após processamento.

3.4. Coleta e análise dos dados

3.4.1 Revisão Sistemática

Com base nos artigos identificados através da estratégia de pesquisa levando em conta as bases de dados informadas e termos buscados, foi realizada a seleção dos estudos que se enquadram nos critérios de elegibilidade descritos. O principal objetivo foi realizar

uma análise crítica dos estudos selecionados, registrando informações relativas à tecnologia utilizada nos mais diferentes estudos, bem como características gerais do efluente analisado para identificar o desempenho em eficiência na redução de carga orgânica, trazendo o contexto das estratégias de tratamento utilizadas no Brasil e as condições que favorecem o uso destes métodos de tratamento.

3.4.2. *Metanálise*

Para validação estatística dos resultados de eficiência em redução da Demanda Bioquímica e Química de Oxigênio observados para os diferentes métodos descritos nos estudos, os resultados dos artigos foram extraídos e tratados, obtendo a média e desvio padrão da eficiência apresentada pelos diferentes tratamentos, de modo a atingir inferências estatísticas. Foi conduzida a Análise de Variação de único e múltiplos fatores (ANOVA) para identificar diferenças significativas entre as médias das diferentes estratégias de tratamento, o teste compara a variância entre o grupo de valores encontrados para cada tratamento e variância entre as matrizes dos tratamentos agrupados, demonstrando a probabilidade de rejeição da hipótese nula e significância estatística da variância observada.

De modo a avaliar a correlação linear entre as variáveis estudadas, também foi considerado o teste de *Pearson*, possibilitando a análise da interferência de um fator sobre o outro.

Para a comparação direta do desempenho das estratégias de tratamento extraído dos estudos avaliados foi considerado o teste de *Tukey*, possibilitando a comparação da diferença dos pares das médias estudadas e comparação com a diferença mínima significativa para verificar se existia variância significativa entre as médias.

4. RESULTADOS

4.1 Revisão sistemática

Considerando os estudos encontrados, foi aplicado de forma primária um filtro de acordo com o título e resumo dos artigos, os artigos que não se enquadraram nos tópicos relacionados com avaliação dos métodos de tratamento de água residual da indústria de laticínios foram desconsiderados.

Deste modo, restaram 44 estudos que tratavam do tratamento de águas residuais das indústrias de laticínios com métodos aeróbios e anaeróbios, assim, foi aplicado um novo filtro através da exclusão de conteúdo duplicado e de estudos que não apresentaram adequadamente os parâmetros definidos nos critérios de elegibilidade desta revisão antes e após o processo de tratamento, como esquematizado na figura 1.

Avaliando os estudos, apenas 16 publicações se enquadraram nos critérios de elegibilidade propostos para a realização da revisão sistemática, dentre os quais, 8 apresentaram a eficiência de métodos aeróbios e anaeróbios em outros países (Índia, 3 estudos; Uruguai, 1 estudo; Estados Unidos, 1 estudo; Espanha, 1 estudo; Itália, 1 estudo; Finlândia, 1 estudo). Os outros 8 estudos apresentaram o contexto brasileiro de tratamento de águas residuais da Indústria de laticínios.

Partindo das perspectivas analisadas nos estudos, 6 publicações apresentaram dados de efluentes e processos industriais, enquanto 10 estudos apresentaram dados de efluentes constituídos de reatores em escala laboratorial. Dentro do cenário brasileiro foi possível analisar o perfil industrial coletado em 2 estudos.

Dentre os procedimentos considerados para o tratamento secundário de efluentes, 8 apresentaram métodos anaeróbios, 5 métodos aeróbios e 3 estudos utilizando ambos os tratamentos. Dentre as metodologias mais utilizadas nos estudos que analisaram a eficiência de métodos anaeróbios estão os reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB) presente em 6 estudos. Os estudos que analisaram o processamento aeróbio, a metodologia de tratamento mais utilizada foi em reatores aerados em batelada sequencial (SBR) (3 estudos). Os estudos abordando os métodos aeróbios e anaeróbios de maneira conjunta utilizaram em sua maioria o processamento em SBR e foram apresentados em 2 estudos.

Os estudos brasileiros tratam principalmente dos reatores UASB (2 estudos) e reatores SBR (2 estudos).

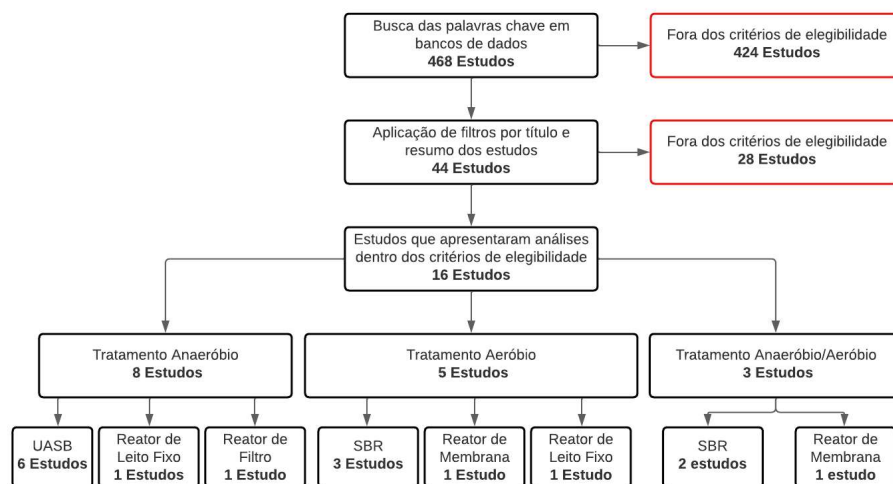


Figura 1: Esquema de busca utilizado na revisão sistemática.

Siglas: UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket, SBR: Sequencing Batch Reactor.

Fonte: Própria.

4.2 Análise dos resultados de eficiência

Com base nos resultados de eficiência obtidos pelos diferentes processos analisados nos estudos, foi construída uma grande base de dados compilando os parâmetros tecnológicos de tratamento e as características dos resíduos antes e após o processo de tratamento descrito nos estudos, os dados de eficiência foram esquematizados de forma simplificada na Tabela 1. Desta forma, foi possível comparar os processos estudados de modo a identificar aqueles que apresentavam maior potencial de redução de DQO e DBO.

Estudo	Reator	Escala	Remoção de DQO (%)	Remoção de DBO (%)
Sivakumar, 2015	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	91,42	90,97
Sivakumar, 2015	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	94,70	96,40
Luostarinen.S.A et al, 2005	UASB (Anaeróbio)	Industrial	74,66	100,00
Luostarinen.S.A et al, 2005	UASB (Anaeróbio)	Industrial	56,68	100,00
Luostarinen.S.A et al, 2005	UASB (Anaeróbio)	Industrial	33,91	10,00
Bhuyar, Kiran D. et al, 2015	UASP (Anaeróbio)	Laboratorial	62,32	66,11
Bhuyar, Kiran D. et al, 2015	UASP (Anaeróbio)	Laboratorial	71,66	76,55
Bhuyar, Kiran D. et al, 2015	UASP (Anaeróbio)	Laboratorial	83,42	81,88
Ramesh, V. et al, 2012	FBBR (Anaeróbio)	Laboratorial	60,33	-
Campos et al, 2004	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	26,98	-
Campos et al, 2004	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	39,53	-
Campos et al, 2004	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	55,77	-
Campos et al, 2004	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	48,96	-
Hamerski.F, 2012	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	58,52	42,68
Favaretto.D et al, 2015	UASB (Anaeróbio)	Industrial	96,20	92,96
Costa, A, 2008	AFR (Anaeróbio)	Laboratorial	82,06	-
Costa, A, 2008	AFR (Anaeróbio)	Laboratorial	88,10	-
Costa, A, 2008	AFR (Anaeróbio)	Laboratorial	87,84	-
Fraga, Florencia, et al, 2017	MBR (Aeróbio/Anaeróbio)	Industrial	97,81	99,77
J.C. Frigon et al, 2009	SBR (Aeróbio/Anaeróbio)	Industrial	89,25	-
J.C. Frigon et al, 2009	SBR (Aeróbio/Anaeróbio)	Industrial	96,25	-
J.C. Frigon et al, 2009	SBR (Aeróbio/Anaeróbio)	Industrial	97,86	-
Schoeninger.F, 2005	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	58,82	-
Schoeninger.F, 2005	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	60,00	-
Schoeninger.F, 2005	SBR (Aeróbio)	Laboratorial	99,90	-
Schoeninger.F, 2005	SBR (Aeróbio/Anaeróbio)	Laboratorial	99,90	-
Tocchi.C, 2012	SBR (Aeróbio)	Industrial	94,00	-
Escobar.F et al, 2004	Reator de Filtro (Aeróbio)	Laboratorial	98,60	-
Escobar.F et al, 2004	SBR (Aeróbio)	Laboratorial	82,00	-
Tenedini.M, 2017	SBR (Aeróbio)	Industrial	95,57	95,39
Zamberlan.G, 2017	Reator de leito fixo (Anaeróbio/Aeróbio)	Laboratorial	90,00	-
Zamberlan.G, 2017	Reator de leito fixo (Anaeróbio/Aeróbio)	Laboratorial	94,00	-
Andrade.L.H, 2011	Reator de Membrana (Aeróbio)	Laboratorial	98,80	99,90
Andrade.L.H, 2011	Reator de Membrana (Aeróbio)	Laboratorial	98,90	99,50

Tabela 1: Resultados de eficiência na remoção de DQO e DBO observados nos estudos analisados.

Siglas: UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASP: Up-flow anaerobic packed bed reactor, FBBR: Fixed Bed Biofilm Reactor, AFR: Anaerobic Filter Reactor, MBR: Membrane Reactor, SBR: Sequencing Batch Reactor.

Fonte: Própria.

A eficiência para remoção de sólidos suspensos totais (TSS) e Nitrogênio também foram consideradas, e são apresentados na Tabela 2.

Estudo	Reator	Escala	Remoção de TSS	Remoção de Nitrogênio
Sivakumar, 2015	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	82,00	42,11
Sivakumar, 2015	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	85,97	42,86
Luostarinen, S.A et al, 2005	UASB (Anaeróbio)	Industrial	82,50	6,67
Luostarinen, S.A et al, 2005	UASB (Anaeróbio)	Industrial	65,12	-12,00
Luostarinen, S.A et al, 2005	UASB (Anaeróbio)	Industrial	31,79	-27,91
Bhuyar, Kiran D. et al, 2015	UASP (Anaeróbio)	Laboratorial	70,24	-
Bhuyar, Kiran D. et al, 2015	UASP (Anaeróbio)	Laboratorial	81,33	-
Bhuyar, Kiran D. et al, 2015	UASP (Anaeróbio)	Laboratorial	93,01	-
Ramesh, V. et al, 2012	FBBR (Anaeróbio)	Laboratorial	-	-
Campos et al, 2004	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	21,83	-
Campos et al, 2004	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	17,52	-
Campos et al, 2004	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	19,80	-
Campos et al, 2004	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	20,90	-
Hamerski F, 2012	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	52,85	53,47
Favaretto D et al, 2015	UASB (Anaeróbio)	Industrial	-	99,03
Costa, A, 2008	AFR (Anaeróbio)	Laboratorial	40,63	-
Costa, A, 2008	AFR (Anaeróbio)	Laboratorial	63,91	-
Costa, A, 2008	AFR (Anaeróbio)	Laboratorial	63,06	-
Fraga, Florencia, et al, 2017	MBR (Aeróbio/Anaeróbio)	Industrial	95,64	95,28
J.C. Frigon et al, 2009	SBR (Aeróbio/Anaeróbio)	Industrial	-	-
J.C. Frigon et al, 2009	SBR (Aeróbio/Anaeróbio)	Industrial	-	-
J.C. Frigon et al, 2009	SBR (Aeróbio/Anaeróbio)	Industrial	-	-
Schoeninger F, 2005	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	-	-
Schoeninger F, 2005	UASB (Anaeróbio)	Laboratorial	-	-
Schoeninger F, 2005	SBR (Aeróbio)	Laboratorial	-	-
Schoeninger F, 2005	SBR (Aeróbio/Anaeróbio)	Laboratorial	-	-
Tocchi, C, 2012	SBR (Aeróbio)	Industrial	-	-
Escobar F et al, 2004	Reator de Filtro (Aeróbio)	Laboratorial	-	-
Escobar F et al, 2004	SBR (Aeróbio)	Laboratorial	-	-
Tenedini M, 2017	SBR (Aeróbio)	Industrial	85,71	75,00
Zamberlan G, 2017	Reator de leito fixo (Anaeróbio)	Laboratorial	19,90	66,67
Zamberlan G, 2017	Reator de leito fixo (Anaeróbio)	Laboratorial	15,22	75,00
Andrade L.H, 2011	Reator de Membrana (Aeróbio)	Laboratorial	65,11	98,05
Andrade L.H, 2011	Reator de Membrana (Aeróbio)	Laboratorial	74,21	89,57

Tabela 2: Resultados de eficiência na remoção de Nitrogênio e Sólidos Suspensos Totais (TSS).

Siglas: UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASP: Up-flow anaerobic packed bed reactor, FBBR: Fixed Bed Biofilm Reactor, AFR: Anaerobic Filter Reactor, MBR: Membrane Reactor, SBR: Sequencing Batch Reactor.

Fonte: Própria.

Os resultados compilados da literatura permitiram a análise da eficiência dos diferentes processos de tratamento. Deste modo, foi possível utilizar ferramentas estatísticas para comparação da eficiência dos diferentes processos. Estes resultados comparativos são mostrados nas figuras a seguir.

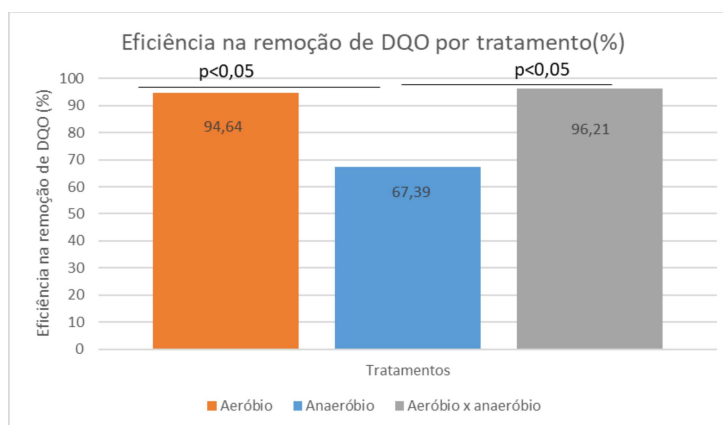


Figura 2: Comparação entre médias consolidadas de eficiência de redução de DQO no tratamento aeróbio, anaeróbio e facultativo, nível de significância $p < 0,01$

Fonte: Própria.

A comparação das médias de eficiência de remoção de DQO nos processos de tratamento aeróbios, anaeróbios e facultativos, mostra que os maiores valores foram observados nos processos aeróbios e facultativos. Também foi observado maior desvio padrão na média dos processos anaeróbios, refletindo maior variação entre os resultados em relação às variáveis dos diferentes estudos.

A comparação das médias de eficiência de remoção de DBO estão mostrados na Figura 2. Os processos aeróbios são mais eficientes do que os anaeróbios, 98,3 e 75,8%, respectivamente. Também foi observado desvio padrão maior nos processos anaeróbios, refletindo maior variação entre os resultados em relação às variáveis dos diferentes estudos.

As estratégias facultativas não foram consideradas nesta análise, por não fornecer quantidade suficiente de dados para tratamento.

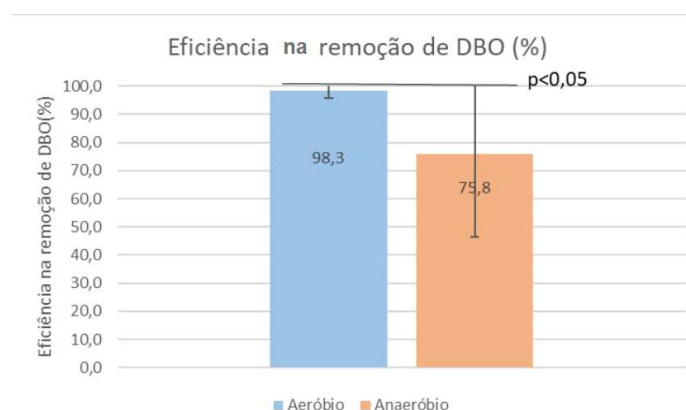


Figura 3: Comparação entre médias consolidadas de eficiência de redução de DBO no tratamento aeróbio e anaeróbio, nível de significância $p<0,01$

Fonte: Própria.

A comparação entre as médias de eficiência de remoção de Nitrogênio nos processos de tratamento aeróbios e anaeróbios estão mostrados na Figura 4.

Foi observado maior eficiência dos aeróbios (82%) em relação aos anaeróbios (30%). Também foi observado maior desvio padrão nos processos anaeróbios, refletindo maior variação entre os resultados em relação às variáveis dos diferentes estudos.

As estratégias facultativas não foram consideradas nesta análise, por não fornecer quantidade suficiente de dados para tratamento.

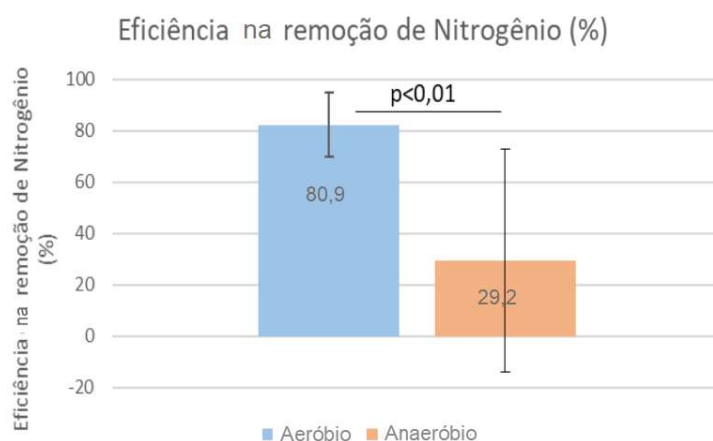


Figura 4: Comparação entre médias consolidadas de eficiência de redução de Nitrogênio no tratamento aeróbio e anaeróbio, nível de significância $p<0,01$

Fonte: Própria.

A comparação entre as médias de eficiência de remoção de TSS (Sólidos Suspensos Totais) estão mostrados na Figura 5. Não foi observada diferença significativa entre os dois processos, 52% e 55%, respectivamente, indicando maiores variações dos resultados analisados.

As estratégias facultativas não foram consideradas nesta análise, por não fornecer quantidade suficiente de dados para tratamento.

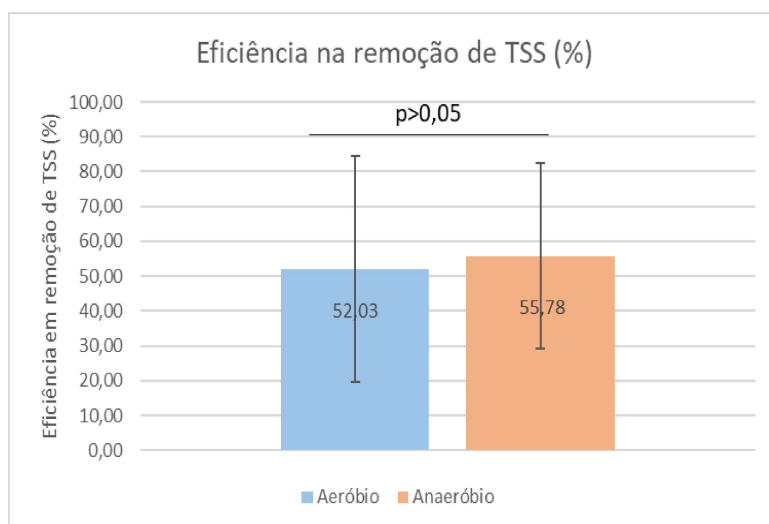


Figura 5: Comparação entre médias consolidadas de eficiência de redução de TSS no tratamento aeróbio e anaeróbio, nível de significância $p < 0,01$

Fonte: Própria.

Análises também foram realizadas para demonstrar a correlação entre as variáveis intrínsecas do processo nos diferentes tratamentos como pH, temperatura, carga orgânica, tempo de retenção hidráulica e eficiência de remoção de DQO. A Figura 6 mostra a correlação entre a eficiência de remoção de DQO e pH para os processos de tratamento aeróbio e anaeróbio.

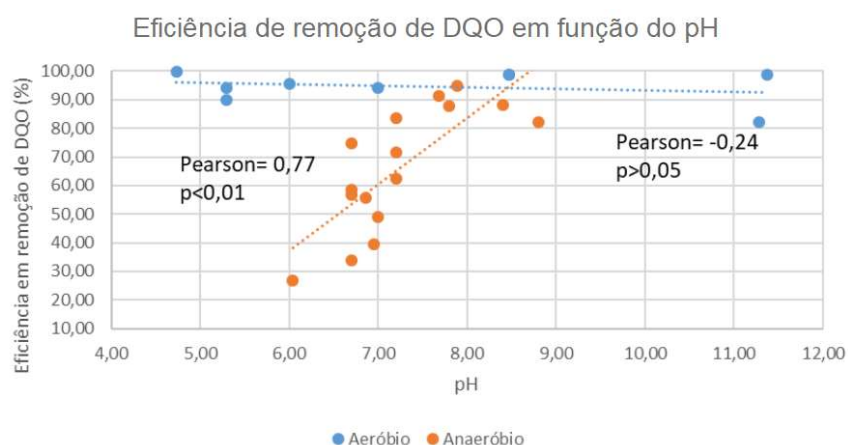


Figura 6: Correlação entre a eficiência de remoção de DQO e pH para os processos de tratamento aeróbio e anaeróbio..

Fonte: Própria.

Os processos aeróbios apresentaram um baixo valor de *Pearson*, com tendência negativa e valor de p acima do valor de α (nível de significância) de 5%, demonstrando insignificância estatística da influência entre a eficiência em remoção de DQO e pH para os processos aeróbios.

O coeficiente de correlação de Pearson descreve a relação linear entre duas variáveis, um resultado próximo de $r=1$ demonstra que as variáveis estudadas estão altamente correlacionadas de forma positiva, de modo que o aumento de uma variável resulta no aumento da outra variável. Enquanto que um resultado próximo de $r=-1$, demonstra uma alta correlação negativa, de modo que o aumento de uma variável reduz a outra de forma linear. Um coeficiente de Pearson próximo de $r=0$ reflete pouca correlação entre as variáveis estudadas, de modo que exista pouca dependência linear entre as variáveis (Mukaka, 2012).

Os processos anaeróbios apresentaram um valor de *Pearson* próximo de 1 e valor de $p < 1\%$, revelando correlação positiva entre a elevação de pH até cerca de 8,7 e eficiência de remoção de DQO.

As estratégias facultativas não foram consideradas nesta análise, por não ter sido encontrado na literatura número de dados suficiente.

A Figura 7 mostra a correlação entre a eficiência de remoção de DQO e *Temperatura* para os processos de tratamento aeróbio e anaeróbio.

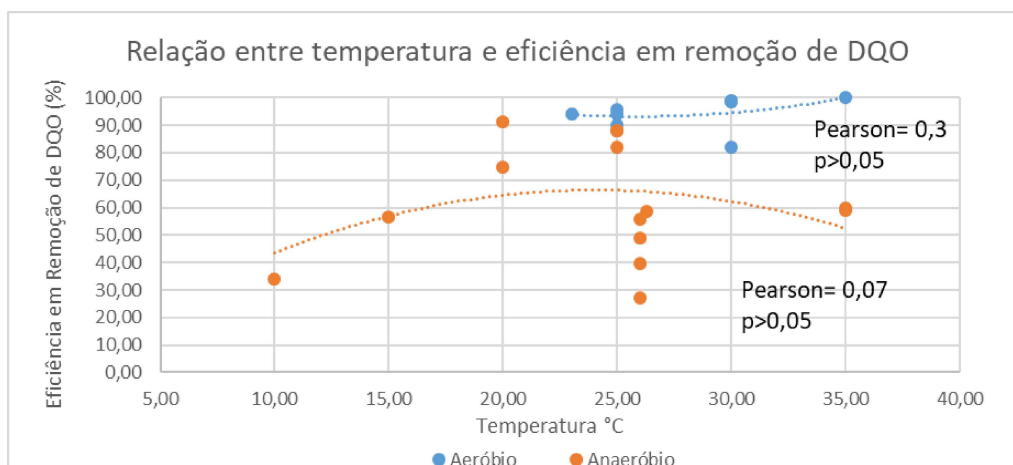


Figura 7: Correlação entre a eficiência de remoção em DQO e temperatura para os processos de tratamento aeróbio e anaeróbio.

Fonte: Própria.

O gráfico apresentado na figura 7 demonstra que os processos aeróbios apresentaram um baixo valor de *Pearson* com tendência positiva e valor de *p* acima do nível de significância de 5%, demonstrando insignificância estatística da influência entre a eficiência em remoção de DQO e *Temperatura* para os tratamentos aeróbios. Os tratamentos anaeróbios apresentaram um valor de *Pearson* baixo e valor de *p* > 5%, indicando correlação positiva não significativa entre a eficiência de remoção de DQO e temperatura.

As estratégias facultativas não foram consideradas nesta análise, por não fornecer quantidade suficiente de dados para tratamento.

A Figura 8 apresenta a correlação entre a eficiência de remoção em DQO e Carga orgânica para os processos de tratamento aeróbio, anaeróbio e facultativo.

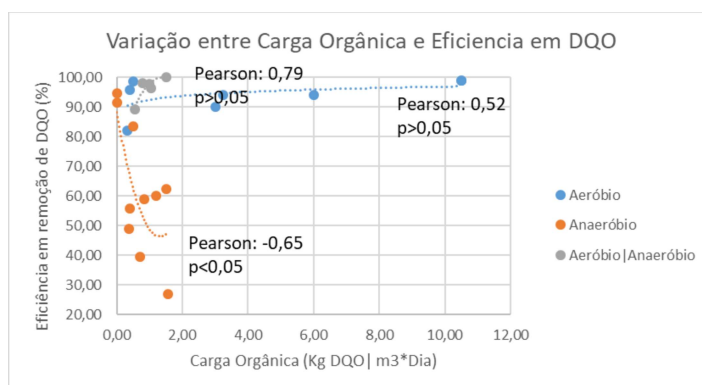


Figura 8: Correlação entre a eficiência de remoção em DQO e Carga orgânica para os processos de tratamento aeróbio, anaeróbio e facultativo.

Fonte: Própria.

Observamos na Figura 8 que os tratamentos aeróbios e facultativos apresentaram um baixo valor de *Pearson* com tendência positiva e valor de *p* acima do nível de significância de 5%, demonstrando insignificância estatística da influência entre a eficiência em remoção de DQO e carga orgânica para os tratamentos aeróbios.

Os tratamentos anaeróbios apresentaram um valor de *Pearson* alto com tendência negativa e valor de $p < 5\%$, revelando uma correlação negativa significativa entre a eficiência de remoção de DQO e carga orgânica.

A Figura 9 mostra a correlação entre a eficiência de remoção de DQO e tempo de retenção hidráulica para os processos de tratamento aeróbio e anaeróbio.

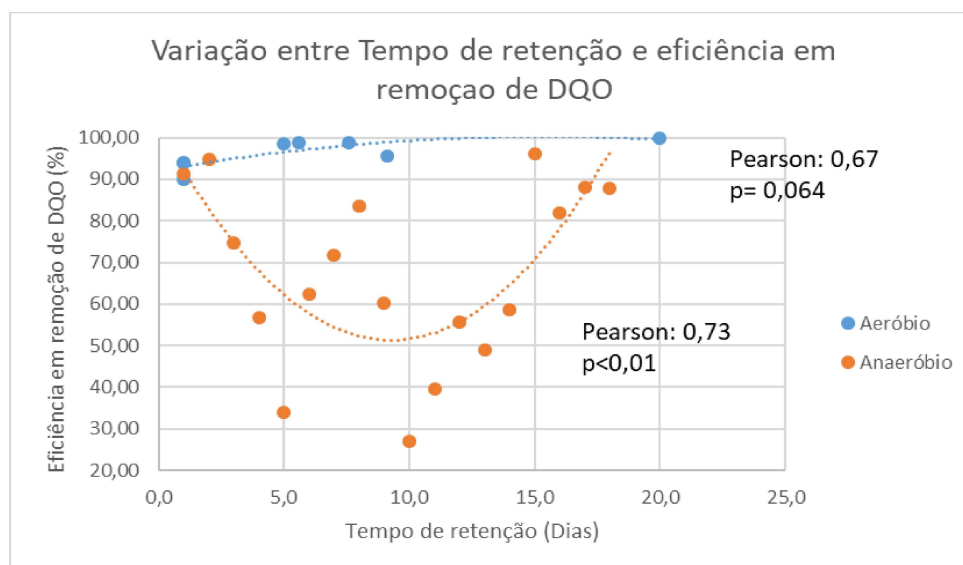


Figura 9: Correlação entre a eficiência de remoção em DQO e tempo de retenção hidráulica para os processos de tratamento aeróbio e anaeróbio.

Fonte: Própria.

Na Figura 9 observamos que os tratamentos aeróbios apresentaram um valor de *Pearson* relativamente alto com tendência positiva e valor de *p* pouco acima do nível de significância de 5%, demonstrando ligeira insignificância estatística da influência entre a eficiência em remoção de DQO e tempo de retenção hidráulica para os tratamentos aeróbios.

Os tratamentos anaeróbios apresentaram um valor de *Pearson* alto e valor de $p < 5\%$, revelando uma correlação positiva significativa entre a eficiência de remoção de DQO e tempo de retenção hidráulica.

As estratégias facultativas não foram consideradas nesta análise, por não fornecer quantidade suficiente de dados para tratamento.

De modo a demonstrar qual dos métodos apresentou maior eficiência na remoção de DQO, foram registrados os tratamentos mais utilizados como estratégia anaeróbia, aeróbia ou facultativa e os resultados em eficiência foram comparados.

Dentre os tratamentos anaeróbios o tratamento mais frequentemente aplicado nos estudos avaliados foi o processamento em reator UASB, enquanto que os tratamentos aeróbios e facultativos mais utilizados foram aqueles que utilizaram o reator SBR.

De acordo com o teste de *Tukey*, mostrado na Tabela 3, observamos que entre os processos de tratamento, os aeróbios e facultativos apresentaram maiores eficiências na remoção de DQO em comparação com métodos de tratamento anaeróbios. Contudo, não houve diferenças significativas entre os tratamentos facultativos e aeróbios.

Diferença Mínima Significativa = 16,95	Média 1	Média 2	Diferença	Resultado
SBR (Aeróbio) x UASB	97,43	75,01	22,42	Significante
SBR (Facultativo) x UASB	96,21	75,01	21,20	Significante
SBR (Facultativo) x SBR (Aeróbio)	96,21	97,43	1,22	Não há diferença

Tabela 3: Teste de Tukey para identificação dos métodos mais eficientes de remoção de DQO, dentre os processos de tratamento mais utilizados .

Fonte: Própria.

5. DISCUSSÃO

De acordo com a análise crítica da metodologia e resultados apresentados pelos estudos avaliados, foram realizadas análises estatísticas para atestar a significância entre as diferenças de desempenho apresentadas pelos diferentes processos de tratamento, bem como as correlações entre a eficiência de tratamento e variáveis intrínsecas dos tratamentos estudados.

A presente discussão propõe a avaliação da eficiência dos diferentes métodos com relação à legislação vigente no país, impacto financeiro e material no desempenho das diferentes estratégias, de modo a discutir a relação custo/benefício no tratamento de efluentes provenientes da indústria de laticínios no contexto brasileiro.

5.1 Influência dos processos na eficiência de remoção de DQO

Com base nos resultados dos estudos e análises estatísticas realizadas, foi observado uma diferença significativa entre as médias de eficiência para remoção de DQO com o tratamento aeróbio, em comparação ao anaeróbio, e facultativo, em comparação ao anaeróbio. A média de eficiência de remoção de DQO atingiu 94 e 96% para os processos aeróbios e facultativos, respectivamente, enquanto que para os processos anaeróbios foi observada média de 67%, ou seja, a redução da quantidade total de matéria orgânica oxidável na efluente final foi maior com os processos aeróbios e facultativos. Contudo, não houve diferença significativa entre a eficiência de remoção de DQO para os métodos aeróbios e facultativos.

A maior eficiência demonstrada por aqueles processos que utilizam alguma etapa aeróbia se deve ao processo de respiração celular, pois os microrganismos obtêm energia para seu crescimento e manutenção por meio de reações de oxirredução. Neste processo a matéria orgânica é o substrato para a formação de grupos doadores de elétrons para alimentação da cadeia oxidativa. O processo de respiração permite maior degradação específica do substrato e, conseqüentemente, possibilita maior geração de energia, favorecendo o crescimento acelerado do biofilme de microrganismos e redução do conteúdo orgânico oxidável (RITTMAN e MCCARTY, 2001).

Dentre os trabalhos publicados coletados, foi constatada a utilização de processos

anaeróbios do tipo UASB, o qual , segundo a literatura, permite a retenção de lodo por longos períodos de tempo, reduzindo assim o tempo retenção hidráulica necessário para tratamento de cargas orgânicas de até 30 kg de DQO/m³/Dia com eficiência entre 90 e 95% (BRITZ, 2004). Porém, de acordo com resultados experimentais publicados, em sua maioria de escala laboratorial, a redução de DQO variou entre 26 e 96%, sendo bastante influenciada por parâmetros secundários de operação do reator, como pH, carga orgânica e tempo de retenção hidráulica. .

Na análise de eficiência na remoção de DBO foi observado que a média de eficiência consolidada para os tratamentos aeróbios apresentou um valor significativamente maior com relação aos métodos anaeróbios, 98 e 76%, respectivamente.

Alguns autores afirmaram que há vantagens na remoção de DBO em lagoas de tratamento facultativo com sedimentação de lodo ativado em comparação a lagoas aeradas, devido ao maior tempo de retenção de lodo e menor dependência de sistemas de aeração (Nasraui. P, 2016). Contudo, neste trabalho não foi encontrado na literatura número suficiente de trabalhos com resultados de eficiência de redução de DBO utilizando lagoas facultativas para provar esta hipótese, e, assim, mais estudos são necessários para melhor discutir este tópico no tratamento de efluentes de indústrias de laticínios.

Quanto à eficiência da remoção de nitrogênio, os métodos aeróbios também apresentaram média geral maior em relação aos métodos anaeróbios, 80% e 29%, respectivamente. Nos efluentes de laticínios são pouco encontradas as formas oxidadas de nitrogênio, que podem ser tóxicas em altas concentrações causando prejuízos à fauna e à flora. Para a remoção do nitrogênio é necessária uma etapa aeróbia para promover a nitrificação (LI et al., 2012).

Neste processo as bactérias consomem dióxido de carbono como fonte de carbono e utilizam como aceptor final de elétrons de oxigênio, assim o nitrogênio é oxidado a nitrato e nitrito. Para esta oxidação, o oxigênio dissolvido é essencial. Após a formação do nitrato ocorre novamente a ação dos microrganismos na desnitrificação para a formação de gás nitrogênio e óxido nitroso (MORETTO, 2014).

Desta forma é explicada a maior eficiência de remoção de nitrogênio nos processos aeróbios e menor em anaeróbios, sendo necessário muitas vezes tratamentos posteriores para a remoção do nitrogênio.

Quanto à remoção geral de sólidos não foram observadas variações significativas entre os métodos estudados. Ambos apresentaram baixa eficiência na remoção geral de sólidos em suspensão, da ordem de 52 a 55%, coerente com as exigidas para o tratamento de efluentes de indústria de laticínios. Os sólidos suspensos encontrados em efluentes de indústria de laticínios são resultantes dos coágulos de leite, sobras de queijo e outros aditivos. 90% do teor total de lipídios é advindo do próprio leite e contribui com o teor de sólidos suspensos encontrados, o conteúdo lipídico é dificilmente degradado em sua totalidade. Nos efluentes de laticínios é verificada elevada concentração de sólidos fixos e baixa concentração de sólidos voláteis, dificultando sua degradação em ambos os sistemas (DEMIREL et al., 2005).

5.2 Variáveis que afetam o desempenho do tratamento biológico

Os resultados mostram que para o mesmo processo de tratamento, houve uma variação de eficiência. Como exemplo, os reatores UASB, que apresentaram eficiências de remoção de DQO entre 26 e 96%. Também foi constatado que parâmetros de processo, como pH, carga orgânica e tempo de retenção hidráulica, influenciavam significativamente na eficiência global do processo.

Considerando as análises realizadas comparando a eficiência em remoção de DQO em efluentes de indústrias de laticínios e o pH em diferentes estratégias de tratamento, foi possível observar que para estratégias de tratamento anaeróbias houve correlação proporcional entre o aumento de pH na faixa de 6 - 8,7 e o desempenho na remoção de DQO, atingindo o máximo de eficiência em pH próximo de 8. Para estratégias de tratamento aeróbio não houve correlação significativa entre pH e desempenho em remoção de DQO, demonstrando que o pH entre 5 - 11 teve pouca influência no desempenho geral de reatores aeróbios. Este fenômeno pode ser explicado de acordo com os resultados observados no estudo publicado por NGUYEN.P.T et al, 2023, o qual demonstrou que bactérias metanogênicas, responsáveis pela degradação de material orgânico em metano em reatores anaeróbios são altamente sensíveis a pH inferior a 7. Embora os microrganismos utilizados em reatores aeróbios sejam também sensíveis a grandes variações de pH, eles permitem que os valores pH sejam trabalhados em faixas mais amplas.

A eficiência de remoção de DQO em função da temperatura teve comportamento

muito diferente do esperado, visto que não houve correlação significativa entre o aumento da temperatura e redução de DQO. de acordo com estudos a eficiência máxima deveria ser observada em 35 °C (Lishman et al, 2000). Uma possível explicação para esta variação pode ser devida ao uso de diferentes classes de microrganismos nos diferentes reatores, por exemplo, bactérias psicrófilas têm preferência por temperaturas entre 0 - 21°C, mesófilas entre 10 - 46° C e Termófilas entre 40 - 73° C (Nalco Company, 2009). De forma geral, alguns parâmetros não foram bem definidos entre os estudos e, assim, não foi possível uma análise mais precisa da influência das variáveis.

A redução da carga orgânica (em termos de DQO) para as diferentes estratégias de tratamento anaeróbio foi verificada uma correlação negativa entre a carga orgânica aplicada e a eficiência na remoção de DQO, demonstrando que, para os estudos que avaliaram técnicas anaeróbias, quanto maior a carga orgânica, menor a eficiência do processo.

Para os reatores aeróbios e facultativos, não houve variação significativa entre carga orgânica e eficiência de remoção de DQO, apresentando alto desempenho para baixa carga orgânica e aumento relativo de eficiência com o aumento da carga.

Embora os valores de eficiência para os métodos anaeróbios tenham sido consideravelmente menores do que o esperado, por se trabalhar com cargas orgânicas tão baixas, outros parâmetros também deveriam ser avaliados como, o tempo de retenção de lodo e tempo de retenção hidráulica. O mesmo vale para os reatores aeróbios, ou seja, maior eficiência para cargas orgânicas menores. Contudo, o contrário foi observado. Neste caso, parâmetros como a difusão de oxigênio e tempo de retenção de lodo seriam importantes para obter correlações mais robustas, porém estes dados não estavam integralmente descritos nos trabalhos.

Observando a importância do tempo de retenção hidráulica para todas as estratégias na remoção de DQO, foi possível constatar que, para os tratamentos anaeróbios, existe uma correlação bem definida, ou seja, quanto maior o tempo de retenção hidráulica, maior a eficiência de remoção de DQO.

Para os tratamentos aeróbios, não houve correlações estatisticamente significativas, contudo, o valor de p ficou muito próximo ao limite de significância, demonstrando que embora o tratamento aeróbio seja menos influenciado pelo tempo de retenção que o tratamento anaeróbio, ainda pode haver influência positiva entre o tempo de retenção

hidráulica e eficiência, tendo em vista que o baixo número de ensaios utilizados para a análise podem ter afetado a distribuição da variação observada.

5.3 Eficiência de remoção em escala laboratorial e industrial.

Dentre os estudos avaliados, apenas $\frac{1}{3}$ foram análises em ambiente industrial, deste modo, nem todos os ensaios refletem em sua totalidade, efluentes reais de indústrias de laticínios e métodos de tratamento em escala industrial, embora as condições laboratoriais sejam criadas para demonstrar processos desenvolvidos na indústria, sabemos que as análises não estão sujeitas às mesmas variações intrínsecas, fato este que pode trazer algum grau de variabilidade aos dados considerados.

5.4 Eficiência observada e resolução CONAMA

De acordo com as políticas de preservação do meio ambiente para controle da liberação de efluentes definidas pela resolução de número Nº 430 DE 13/05/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, observamos os critérios discutidos pelos estudos para avaliação de eficiência no processo de tratamento da efluente final:

- pH entre 5 a 9;
- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5 dias a 20°C): remoção mínima de 60% de DBO sendo que este limite só poderá ser reduzido no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor;

De acordo com os estudos incluídos nesta análise, foi revelado que independentemente do método de tratamento aplicado, todos apresentaram valores de pH no efluente final em linha com os critérios de pH estabelecidos na resolução nº 430 do CONAMA para emissão em corpos de água.

Quanto ao critério de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), todos os ensaios desenvolvidos em estratégias facultativas e aeróbias apresentaram resultados dentro dos critérios mínimos de remoção, contudo, 20% dos ensaios realizados em reatores anaeróbios apresentaram resultados insatisfatórios para emissão de resíduos no meio ambiente.

5.5 Recursos operacionais e financeiros para tratamento

Os resultados levantados na presente revisão não permitiram uma avaliação econômica robusta, tendo em vista que a grande maioria dos estudos considerados foram baseados em análises laboratoriais, sem dados de reatores industriais, para estimativa de recursos operacionais e financeiros necessários para os mais diferentes tratamentos. Porém, ainda foi possível discutir os resultados com base em levantamentos econômicos realizados por outros estudos (Eckenfelder, 1988).

De acordo com dados da literatura os custos financeiros de sistemas de tratamento aeróbio são mais sensíveis ao aumento de carga orgânica em comparação aos sistemas anaeróbios, devido ao aumento proporcional do volume de aeração necessário para o tratamento de cargas orgânicas elevadas, para sistemas de tratamento anaeróbio; o volume do reator para baixas cargas orgânicas é controlado por variáveis hidráulicas (Eckenfelder, 1988).

A energia necessária para tratamentos aeróbios aumenta rapidamente com a carga orgânica, visto que a aeração necessita de maior gasto energético. Para sistemas anaeróbios, o consumo de eletricidade é muito menor e virtualmente constante para amplas faixas de carga orgânica, uma vez que os custos de bombeamento são menores (Eckenfelder, 1988).

Custos de manutenção são necessários para ambos sistemas. No sistema anaeróbio, por exemplo, grande parte dos investimentos de manutenção são relativos ao processo de tratamento de gás e alcalinização do efluente, já no sistema aeróbio, os gastos mais significativos estão voltados ao sistema de aeração e tratamento do excesso de lodo resultante do tratamento (Eckenfelder, 1988).

Assim, a relação custo/benefício para o tratamento de efluentes de alta carga orgânica é maior para tratamentos anaeróbios, enquanto que tratamentos com baixa carga orgânica podem se beneficiar de tratamentos aeróbios a depender da eficiência almejada ao processo (Eckenfelder, 1988).

O pré-tratamento anaeróbio para posterior tratamento aeróbio, foi uma estratégia que apresentou alta eficiência e estabilidade na remoção de matéria orgânica. O método também

apresentou pouco aumento de custo em comparação aos sistemas inteiramente anaeróbios, se apresentando como uma abordagem custo-efetiva no tratamento de efluentes de alta carga orgânica (Eckenfelder, 1988).

Tendo em vista a elevada carga orgânica de efluentes provenientes da indústria de laticínios e alta eficiência de remoção de laticínios solicitada por órgãos reguladores como o CONAMA, é importante que sejam adotados sistemas que permitam o uso de menor quantidade de recursos com alta eficiência. De acordo com a análise de *Tukey*, realizada na validação estatística dos resultados da revisão, os processos baseados em reator aeróbio sequencial em batelada e reator sequencial em batelada facultativo (Anaeróbio/Aeróbio) apresentaram maior eficiência em relação ao tratamento em reator UASB (Anaeróbio). Considerando a relação custo/benefício em custos operacionais, o processo de reator sequencial em batelada facultativo seria preferível para tratamento de efluentes provenientes da indústria de laticínios.

6. CONCLUSÃO

A revisão sistemática realizada neste estudo possibilitou a análise de 16 trabalhos publicados, que tratam do desempenho de estratégias de tratamento aeróbio, anaeróbio e facultativo empregados no tratamento de efluentes de indústrias de laticínios, permitindo a avaliação dos métodos realizados quanto a sua eficiência.

Os resultados tratados destes 16 trabalhos permitiram o desenvolvimento de análises estatísticas de comparação entre os resultados observados para o desempenho de métodos aeróbios, anaeróbios e conjuntos. Dados de eficiência de remoção de DQO demonstraram que as estratégias de tratamento aeróbias e facultativas apresentaram eficiências maiores do que os processos de tratamento anaeróbios, 94%, 96% e 67% ($p < 0,05$), respectivamente.

Os resultados de eficiência de remoção de DBO também apresentaram melhores resultados com o emprego de estratégias aeróbias em comparação às estratégias anaeróbias, 98% e 75%, respectivamente.

Para a remoção de nitrogênio, foi observada uma grande diferença de desempenho entre os processos. Processos aeróbios apresentaram, em média, 81% de remoção de nitrogênio, enquanto os processos anaeróbios apresentaram eficiência média de 29%.

Para a remoção de sólidos suspensos, ambos os métodos apresentaram baixa eficiência.

De acordo com as resoluções do CONAMA, para emissão de efluentes no meio ambiente, os valores de eficiência de remoção de DBO estiveram dentro dos limites permitidos em sua totalidade para os tratamentos aeróbios e facultativos, enquanto que tratamentos anaeróbios apresentaram alto grau de variação e alguns estudos apresentaram valores inferiores aos padrões definidos.

As correlações observadas entre eficiência geral dos processos e variáveis de processo demonstraram que o desempenho de tratamentos anaeróbios foram mais influenciados por parâmetros como pH, temperatura, carga orgânica e tempo de retenção hidráulica, do que em tratamentos aeróbios.

Observando os métodos de tratamento mais frequentemente publicados, os processos em reatores sequenciais em batelada (SBR), aeróbios e facultativos, apresentaram significativamente melhores resultados do que outros tratamentos anaeróbios. De acordo

com a análise de custo geral de processos operacionais de tratamento, para a alta carga orgânica tratada em efluentes resultantes de processos industriais envolvidos no processamento de laticínios, o tratamento SBR facultativo seria a escolha mais custo-efetiva para remoção de compostos orgânicos.

Recentemente, no contexto brasileiro e mundial, o consumo de leite e seus derivados, tem crescido exponencialmente, com isso houve também o crescimento acentuado no número de indústrias que trabalham com o processamento de leite bruto e seus derivados. Os efluentes resultantes do processamento de laticínios são caracterizados pela presença de alta carga de material orgânico e sólidos lipídicos, resíduos que quando descartados sem o tratamento devido podem trazer danos ao meio ambiente

Tendo em vista que grande parte dos processos industriais envolvendo operações com laticínios são realizados por empresas de pequeno e médio porte, sem muitas vezes o aporte necessário para tratamento correto do efluente antes de sua emissão ao meio ambiente, se torna importante mensurar o potencial de eficiência e relação custo/benefício dos vários processos para fornecer subsídios que favoreçam a sua implementação à rotina das indústrias de laticínios brasileiras.

7. REFERÊNCIAS

ABIA. Números do Setor – Faturamento. Associação Brasileira das Indústrias de Alimentação, 2019. Disponível em: <https://www.abia.org.br/vsn/temp/z202055RelatorioAnual2019.pdf>. Acesso em: 21 Feb 2023

Almeida, N.M. et al. ANÁLISE DOS MÉTODOS MAIS UTILIZADOS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES EM LATICÍNIOS. 53º Congresso Brasileiro de Química, Realizado no Rio de Janeiro/RJ, de 14 a 18 de Outubro de 2013. ISBN: 978-85-85905-06-4

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Water Works Association. Water Environmental Federation. 21. ed. Washington, DC: APHA-AWWA-WEF, 2005.

ANDRADE, L. H. Tratamento de efluente de indústria de laticínios por duas configurações de biorreator com membranas e nanofiltração visando o reúso. 214 p. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

AZBAR, N.; YONAR, T. Comparative evaluation of a laboratory and full-scale treatment alternatives for the vegetable oil refining industry wastewater. Process Biochemistry 39, 869-875, 2004.

Begnini, B. C., Ribeiro, H. B. Plano para redução de carga poluidora em indústria de laticínios. Saúde e Meio Ambiente. v. 3, n. 1, p. 19 – 30, 2014.

Bhuyar, Kiran D., Sanvidhan G. Suke, and S. D. Dawande. "Treatment of milk wastewater using up-flow anaerobic packed bed reactor." Polish Journal of Chemical Technology 17.2 (2015): 84-88.

BRASIL. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa da Pecuária Municipal - PPM. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=destaques>. Acesso em 21 Feb 2023.

BRASIL. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Agropecuário. 2017. Disponível em: https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/pecuaria.html. Acesso em 21 Feb 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/atos-normativos-sistema> . Acesso em: 21 Feb 2023

Brazzale, Piercristiano, et al. "Wastewater treatment in dairy processing-innovative solutions for sustainable wastewater management." Bulletin of the International Dairy Federation 500 (2019).

BRIÃO, V. B.; TAVARES, C. R. G. Ultrafiltração como processo de tratamento para reúso de efluentes de laticínios. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Vol. 12, n. 2. Abr/jun, 2007, p. 134-138.

Britz, T.J.; Van Der Merwe, M.; Riedel, K.-H.J. Influence of phenol additions on the efficiency of an anaerobic hybrid digester treating landfill leachate. *Biotech. Lett.* 1992, 14, 323–327.

Britz, Trevor J., Carné van Schalkwyk, and Yung-Tse Hung. "Treatment of dairy processing wastewaters." *Handbook of Industrial and Hazardous Wastes Treatment*. CRC Press, 2004. 673-705.

BRITZ, T. Dealing with environmental issues. In: *Advanced dairy science and technology*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2008, cap. 2, p. 35-75

Cameron, K.C.; Di, H.J.; McLaren, R.G. Is soil an appropriate dumping ground for our wastes? *Aust. J. Soil Res.* 1997, 35, 995–1035.

CAMMAROTA, M. C.; FREIRE, D. M. G. A review on hydrolytic enzymes in the treatment of wastewater with high oil and grease content. *Bioresource Technology*, v. 97, n. 17, p. 2195-2210, 2006.

Campos, Cláudio Milton Montenegro, et al. "Avaliação da eficiência do reator UASB tratando efluente de laticínio sob diferentes cargas orgânicas." *Ciência e Agrotecnologia* 28 (2004): 1376-1384.

Cánovas-Díaz, M.; Howell, J.A. Down-flow anaerobic filter stability studies with different reactor working volumes. *Proc. Biochem.* 1987, 22, 181–184.

Carta-Escobar, F., et al. "Aerobic purification of dairy wastewater in continuous regime: Part I: Analysis of the biodegradation process in two reactor configurations." *Biochemical engineering journal* 21.2 (2004): 183-191.

COHEN, J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. New York, NY: Academic Press, 1969.

COSTA, Amália Michelle Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2008. Performance of anaerobic filter in treatment of formulated effluent with different concentrations cheese whey. Adviser: Frederico Vieira Passos. Co-Advisers: Ismael Maciel de Mancilha and Nélio José Andrade.

de Andrade, Laura Hamdan. "Tratamento de efluente de indústria de laticínios por duas configurações de biorreator com membranas e nanofiltração visando o reúso."; *Dissertação (mestrado)* - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2011. f.200-214.

Donkin, J. Bulking in aerobic biological systems treating dairy processing wastewaters. *Int. J. Dairy Tech.* 1997, 50, 67–72.

EMBRAPA - O Mercado Consumidor de Leite e Derivados. Juiz de Fora. 2019. Siqueira,K. disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199791/1/CT-120MercadoConsumidorKennya.pdf>. Acesso em 23 jan. 2022.

Eckenfelder, W. W., J. B. Patoczka, and G. W. Pulliam. "Anaerobic versus aerobic treatment in the USA." Proceedings of the 5th International Symposium of Anaerobic Digestion. 1988.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO STAT - Livestock Primary. Roma, Italy, 2022.

Favaretto, Danúbia Paula Cadore, et al. "ANÁLISE TÉCNICA DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE EMPRESA DE LATICÍNIOS DA REGIÃO DE PASSO FUNDO/RS." Revista CIATEC-UPF 7.2 (2015).

Fraga, Florencia Arón, et al. "Evaluation of a membrane bioreactor on dairy wastewater treatment and reuse in Uruguay." International Biodeterioration & Biodegradation 119 (2017): 552-564.

Frigon, J-C., et al. "The treatment of cheese whey wastewater by sequential anaerobic and aerobic steps in a single digester at pilot scale." Bioresource technology 100.18 (2009): 4156-4163.

GDP – Global Dairy Platform. Annual Review 2016. Rosemont, IL, [2017]. Disponível em:
<<https://www.globaldairyplatform.com/wp-content/uploads/2018/04/2016-annual-review-final.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2022.

Gonçalves, Bianca Zamberlan. Tratamento de efluente de laticínio em reator de leite estruturado aeróbio. BS thesis. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

Gough, R.H.; Samkutty, P.J.; McGrew, P.; Arauz, A.; Adkinson, A. Prediction of effluent biochemical oxygen demand in a dairy plant SBR waste water system. J. Environ. Sci. Health. 2000, A35, 169–175.

Hamerski, Fernando. "Partida de um reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) no tratamento de efluentes provenientes de uma indústria de laticínios."; Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, (2012).

HENARES, Juliana F. Caracterização do Efluente de Laticínio: análise e proposta de tratamento. 2015. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Alimentos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

IDF. Anaerobic treatment of dairy effluents – The present stage of development. Bull. Inter. Dairy Fed., Doc. 1990, 252.

KOETZ, P. R.; FARIA, O. L. V.; NUNES, W. A. Tratamento de efluentes da indústria de arroz parboilizado por digestão anaeróbia em reatores de fluxo ascendente. Revista Brasileira de Agrociência, v. 2, n. 2, p. 117-120, 1996.

Lebrato, J.; Perez-Rodriguez, J.L.; Maqueda, C.; Morillo, E. Cheese factory wastewater treatment by anaerobic semicontinuous digestion. Res. Cons. Recyc. 1990, 3, 193–199.

Lewis, S., Clarke, M. (2001). Forest Plots: Trying to See the Wood and the Trees. *Bmj*. 322(7300), 1479– 1480

LI, J.; PENG, Y.; GU, G.; WEI, S. Factors affecting simultaneous nitrification and denitrification in an SBBR treating domestic wastewater. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, v. 1, n. 2, p. 246-250, 2007.

Lishman, L. A., R. L. Legge, and G. J. Farquhar. "Temperature effects on wastewater treatment under aerobic and anoxic conditions." *Water Research* 34.8 (2000): 2263-2276.

Luostarinen, Sari A., and Jukka A. Rintala. "Anaerobic on-site treatment of black water and dairy parlour wastewater in UASB-septic tanks at low temperatures." *Water research* 39.2-3 (2005): 436-448.

MACHADO, R. M. G. et al. *Minas Ambiente – Controle Ambiental nas Pequenas e Médias Indústrias de Laticínios*. Belo Horizonte: 2002. 223 p.

Maris, P.J.; Harrington, D.W.; Biol, A.I.; Chismon, G.L. Leachate treatment with particular reference to aerated lagoons. *Water Poll. Cont.* 1984, 83, 521–531.

MENDES, A. A; PEREIRA, E. B.; CASTRO, H. F. Effect of the enzymatic hydrolysis pretreatment of lipids-rich wastewater on the anaerobic biodigestion. *Biochemical Engineering Journal* , v. 32, p. 185-190, 2006.

MILKPOINT. Ranking Leite Brasil: captação das maiores empresas cresce 5,9% em 2014. Disponível em: <<http://www.milkpoint.com.br/cadeia-do-leite/giro-lacteo/ranking-leite-brasil-captacao-da-s-maiores-empresas-cresce-59-em2014-94625n.aspx>>. Acesso em 21 Fev 2023.

Monali Gotmare, R.M. Dhoble, A.P. Pittule (2011) Biomethanation of Dairy Waste Water Through UASB at Mesophilic Temperature Range , Vol.8 Issue 1, 001-009

MORAIS, J.L. Estudo da potencialidade de processos oxidativos avançados, isolados e integrados com processos biológicos tradicionais, para tratamento de chorume de aterro sanitário. Curitiba. Tese (doutorado Universidade Federal do Paraná). 229f, 2005.

MORETTO, C. Remoção de matéria orgânica e nitrogenada de efluente de indústria de ração animal em reatores de leito estruturado e móvel. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2014.

MTE. Ministério do Trabalho e Emprego. Relação Anual de Informações Sociais – RAIS. 2015 Brasília: RAIS. Disponível em: <http://pdet.mte.gov.br/rais/rais-2015> . Acesso em: 21 Fev 2023

Mukaka MM. Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Med J*. 2012 Sep;24(3):69-71. PMID: 23638278; PMCID: PMC3576830.

Nalco Company. *The Nalco Water Handbook*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2009.

Nasraui, P. Dimensionamento de lagoas aeradas seguidas de lagoas de sedimentação. Hydro. Sept 2016. Disponível em: https://www.arandanet.com.br/revista/hydro/materia/2017/10/06/dimensionamento_de_lagoas.html . Acesso em 03/03/2023

Nguyen, P. Y., et al. "The impact of pH on the anaerobic and aerobic metabolism of Tetrasphaera-enriched polyphosphate accumulating organisms." Water Research X (2023): 100177.

OMIL, F. Anaerobic filter reactor performance for the treatment of complex dairy wastewater at industrial scale. Water Research. Vol. 37, p. 4099-4108, 2003

Otis, R.J. 2001. Boundary Design: A Strategy for Subsurface Wastewater Infiltration System Design and Rehabilitation. On-Site Wastewater Treatment Procedures: Proceedings of the Ninth National Symposium on Individual and Small Community Sewage Systems. ASAE. St. Joseph MI. p 245-260.

Page M J, McKenzie J E, Bossuyt P M, Boutron I, Hoffmann T C, Mulrow C D et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews BMJ 2021; 372 :n71 doi:10.1136/bmj.n71

Pereira, S. A. G.. Influência da variação de FeSO₄ no tempo de decantação dos sólidos sedimentáveis de resíduo líquido de laticínio nos processos fenton e foto fenton solar. Revista Brasileira de Energias Renováveis. v.7, n.1, p. 156 - 169, 2018.

Ramesh, V. Nehru kumar and G. Srinivasan (2012), Kinetic Evaluation of Fixed Film Fixed Bed Anaerobic Reactor by Using Dairy WasteWater International Journal of Pharmaceutical & Biological Archive; 3(4):835-837

RITTMANN, B. E.; MCCARTY, P. L. Environmental biotechnology: principles and applications. New York: McGrawHill, v. 400, 2001.

Robinson, T. The real value of dairy waste. Dairy Ind. Int. 1997, 62 (3), 21–23.

ROSA, D. R. Tratamento Enzimático/Biológico de Efluentes com Alto Teor de Gordura, Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro). 107f, 2004.

Ross, W.R. Anaerobic treatment of industrial effluents in South Africa. Water SA 1989, 15, 231–246.

Ross, W.R. Anaerobic Digestion of Industrial Effluents With Emphasis on Solids-Liquid Separation and Biomass Retention, Ph.D. Thesis, University of the Orange Free State Press, South Africa, 1991.

Russell, P. Effluent and wastewater treatment. Milk Ind. Int. 1998, 100 (10), 36–39.

SABESP. Norma Técnica Interna SABESP: NTS 013. São Paulo, 2009.

Sahm, H. Anaerobic wastewater treatment. Adv. Biochem. Eng. Biotech. 1984, 29, 83–115.

SARAIVA, C. B.; MENDONÇA, R. C. S.; SANTOS, A. L.; PEREIRA, D. A. Consumo de água e geração de efluentes em uma indústria de laticínios. Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes, v. 64, n. 367, p. 10-18, 2009.

Sivakumar, R., and V. Sekaran. "Comparative study of performance evaluation of UASB reactor for treating synthetic dairy effluent at psychrophilic and mesophilic temperatures." Nature Environment and Pollution Technology 14.3 (2015): 679.

Schoeninger, Franciane. "Estudo da biodegradabilidade de efluentes de laticínios." (2005). Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/102302/222334.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 03/03/2023.

Smith, P.G.; Scott J.S. (Eds.) Dictionary of Water and Waste Management; IWA Publishing. Butterworth Heinemann: Oxford, UK, 2002.

Steffen, Robertson, Kirsten Inc. Water and Waste-water Management in the Dairy Industry, WRC Project No. 145 TT38/89. Water Research Commission: Pretoria, South Africa, 1989.

Strydom, J.P.; Mostert, J.F.; Britz, T.J. Effluent production and disposal in the South African dairy industry—a postal survey. Water SA 1993, 19 (3), 253–258.

Strydom, J.P.; Mostert, J.F.; Britz, T.J. Anaerobic digestion of dairy factory effluents. WRC Report No 455/1/01. ISBN 1868457249; Water Research. Commission: Pretoria, South Africa, 2001.

Talaiekhosani, Amirreza. "A review on different aerobic and anaerobic treatment methods in dairy industry wastewater." Goli A, Shamiri A, Khosroyar S, Talaiekhosani A, Sanaye R, Azizi K. A review on different aerobic and anaerobic treatment methods in dairy industry wastewater. Journal of Environmental Treatment Techniques 7.1 (2019): 113-41.

Tenedini, Marcos Vinícius. "Avaliação da eficiência do tratamento biológico, tipo lodo ativado, de uma indústria de laticínio."; CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES, (2017).

Thirumurthi, D. Biodegradation of sanitary landfill leachate. In Biological Degradation of Wastes, A.M. Martin, Ed. Elsevier Appl. Sci.; London, UK, 1991; 208.

Tocchi, Carlo, et al. "Aerobic treatment of dairy wastewater in an industrial three-reactor plant: Effect of aeration regime on performances and on protozoan and bacterial communities." water research 46.10 (2012): 3334-3344.

Uddin, Md Mosleh, and Mark Mba Wright. "Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances." Physical Sciences Reviews (2022).

VIDAL, G.; CARVALHO, A.; MÉNDEZ, R.; LEMA, J. M. Influence of the content of fats and proteins on the anaerobic biodegradability of dairy wastewater. Bioresource Technology, v. 74, p. 231-239, 2000.

VILLA, R. D. et al. Potencial de aplicação do processo foto-fenton/solar como

prétratamento de efluente da indústria de laticínios. Química Nova, vol. 30, no . 8, 1799-1803 p., 2007. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000800002

Viechtbauer, W. (2010). Conducting meta-analyses in R with the metaphor package. Journal of Statistical Software. 36(3), 1-48.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

Von Sperling, Marcos, Matthew E. Verbyla, and Sílvia MAC Oliveira. Assessment of treatment plant performance and water quality data: a guide for students, researchers and practitioners. IWA publishing, 2020.

Weber, H.; Kulbe, K.D.; Chmiel, H.; Troßsch, W. Microbial acetate conversion to methane: kinetics, yields and pathways in a two-step digestion process. Appl. Microb. Biotech. 1984, 19, 224–228.

Yulistyorini, Anie, Kyky Sunaryo, and Miller Alonso Camargo-Valero. "Hybrid Anaerobic Baffled Reactor and Upflow Anaerobic Filter for Domestic Wastewater Purification." Environmental Degradation: Challenges and Strategies for Mitigation. Cham: Springer International Publishing, 2022. 149-164.

8. ANEXOS

1. Tabela suplementar de dados coletados dos estudos incluídos na revisão sistemática .

DocuSigned by:
Guilherme Lemos
20650DB907344B9...

assinatura do aluno(a)

Guilherme Afonso R. Lemos

São Paulo, 20/05/2023

DocuSigned by:
Mauri Sergio Alves Palma
33FF25F8F690460...

assinatura do orientador(a)

Mauri Sergio Alves Palma

São Paulo, 20/05/2023