

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE ALIMENTOS

Camila Favretto de Souza

**Pós tratamento por eletrocoagulação de efluente do processamento do
soro de leite tratado por reator anaeróbio**

Passo Fundo

2021

Camila Favretto de Souza
Bacharel em Química

**Pós tratamento por eletrocoagulação de efluente do processamento do
soro de leite tratado por reator anaeróbio**

Relatório de Dissertação apresentado como um dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Hemkemeier
Linha de pesquisa: Processos biotecnológicos e não convencionais na produção de alimentos e ingredientes.

Passo Fundo
2021

CIP – Catalogação na Publicação

S729p Souza, Camila Favretto de
Pós tratamento por eletrocoagulação de efluente do
processamento do soro de leite tratado por reator anaeróbio /
Camila Favretto de Souza. – 2021.
74 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Hemkemeier.
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de
Alimentos.) – Universidade de Passo Fundo, 2021.

1. Soro do leite. 2. Águas residuais - Purificação -
Tratamento biológico. 3. Águas residuais - Purificação -
Tratamento eletrolítico. 4. Resíduos orgânicos - Purificação.
I. Hemkemeier, Marcelo, orientador. II. Título.

CDU: 628.179

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS**

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação de Mestrado

**“Pós-tratamento por eletrocoagulação de efluente do processamento do soro de
leite tratado por reator anaeróbio”**

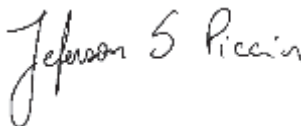
Elaborada por
Camila Favretto de Souza

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestra em Ciência e Tecnologia de Alimentos

Comissão Examinadora



**Marcelo Hemkemeier, Dr., UPF
(Orientador/Presidente)**



Jeferson Steffanello Piccin, Dr., UPF



Camille Eichelberger Granada, Dra., Univates

**Passo Fundo, RS, Brasil
2021**

RESUMO

O soro de leite é um subproduto da fabricação do queijo, rico em lactose, proteína e minerais e com importância econômica. Do processamento do soro de leite, resta um efluente a ser tratado, rico em matéria orgânica e nutrientes, que precisa de tratamento adequado para minimizar os impactos ambientais do seu lançamento. O tratamento anaeróbio demonstra ser uma boa alternativa de tratamento para esse tipo de efluente devida a sua capacidade de remoção de matéria orgânica, contudo, esse tratamento não tem boa eficiência na remoção de nutrientes, sendo necessário um tratamento complementar. Neste sentido, a eletrocoagulação pode ser uma alternativa devida a sua capacidade de redução de volume de lodo e boa remoção de nutrientes. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar se a eletrocoagulação, como método de pós tratamento anaeróbio de efluente gerado no processamento do soro de leite é eficaz na remoção de DQO e fósforo. O presente trabalho avaliou a eficiência na remoção de carga orgânica e nutrientes através da combinação de processos anaeróbio e eletrolítico no tratamento de efluente do beneficiamento do soro de leite. No tratamento em reator anaeróbio, foi utilizado tempo de retenção de 3 e 10 dias e temperaturas de 15, 25 e 35°C. O efluente tratado desse processo, foi encaminhado para tratamento em um reator eletrolítico, sendo estudado o tipo de eletrodo (Ferro e Alumínio), o tempo de tratamento (20 e 40 min) e a densidade de corrente (0,5 e 1,0 A/m²). O tratamento anaeróbio demonstrou ser eficiente, obtendo remoção superior a 99% na cor aparente, 97% na turbidez e 98% na DQO nas temperaturas de 25 e 35°C pelo período de 10 dias. O mesmo comportamento não foi observado na remoção de fósforo, comprovando a necessidade de pós tratamento. A melhor remoção de DQO foi com eletrodo de ferro alcançando 91% e de fósforo com eletrodo de alumínio, obtendo 64% de remoção, demonstrando que o tratamento eletrolítico após tratamento anaeróbio é um método eficiente de pós tratamento para o efluente do soro de leite.

Palavras-chave: Soro de leite. Tratamento biológico. Tratamento eletrolítico.

ABSTRACT

Whey is a by-product of cheese making, rich in lactose, protein and minerals and of economic importance. From the processing of whey, there remains an effluent to be treated, rich in organic matter and nutrients, which needs adequate treatment to minimize the environmental impacts of its release. Anaerobic treatment proves to be a good treatment alternative for this type of effluent due to its ability to remove organic matter, however, this treatment is not good at removing nutrients, requiring a complementary treatment. In this sense, electrocoagulation can be an alternative due to its capacity to reduce sludge volume and good removal of nutrients. Thus, the objective of this work is to evaluate whether electrocoagulation, as a method of anaerobic after-treatment of effluent generated in the processing of whey, is effective in removing COD and phosphorus. The present work evaluated the efficiency in the removal of organic charge and nutrients through the combination of anaerobic and electrolytic processes in the treatment of effluent from the processing of whey. In the treatment in anaerobic reactor, retention time of 3 and 10 days and temperatures of 15, 25 and 35°C were used. The effluent treated from this process was sent for treatment in an electrolytic reactor, being studied the type of electrode (Iron and Aluminum), the treatment time (20 and 40 min) and the current density (0.5 and 1.0 A / m²). The anaerobic treatment proved to be efficient, obtaining removal greater than 99% in apparent color, 97% in turbidity and 98% in COD at temperatures of 25 and 35°C for a period of 10 days. The same behavior was not observed in the removal of phosphorus, proving the need for post-treatment. The best COD removal was with an iron electrode reaching 91% and phosphorus with an aluminum electrode, obtaining 64% removal, demonstrating that the electrolytic treatment after anaerobic treatment is an efficient method of after treatment for the whey effluent.

Keywords: Whey. Biological treatment. Electrolytic treatment.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. ARTIGO DE REVISÃO.....	12
3. ARTIGO EXPERIMENTAL.....	36
4. CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS	57
ANEXO A – RESULTADO DO TRATAMENTO DE DQO ANALISADO PELA ANOVA.....	60
ANEXO B – RESULTADO DO TRATAMENTO DE FÓSFORO ANALISADO PELA ANOVA	65
ANEXO C – RESULTADO DO TRATAMENTO DE RESÍDUO DE METAL ANALISADO PELA ANOVA.....	70
ANEXO D – ANÁLISE DA VARIÂNCIA DAS VARIÁVEIS.....	74

1 INTRODUÇÃO

A produção de queijo tem apresentado elevada taxa de crescimento nos últimos anos no Brasil. Segundo Embrapa (2020), no ano de 2019 foram utilizados 8510 milhões de litros de leite para a produção de queijo no país.

Com a produção de queijo é gerado o soro de leite, um subproduto rico em lactose e proteínas, caracterizado pela cor verde-amarelada, resultante da presença de riboflavina (vitamina B₁₂). Esse subproduto contém aproximadamente 55% dos nutrientes do leite e é considerado uma fonte valiosa para a indústria de alimentos. Do ponto de vista ambiental, esse subproduto constitui um grave problema de poluição (MERKEL et al., 2021; MENDOZA et al., 2021).

A recuperação dos principais componentes do soro de leite, como proteínas solúveis e lactose são uma forma de valorização desse subproduto, agregando valor ao mesmo (AMADO et al., 2021).

As águas residuais provenientes da valorização são constituídas por diferentes diluições de soro de leite com água de lavagem, que geralmente contém produtos químicos ácidos e alcalinos utilizados neste processo. As águas residuais do soro de leite são uma preocupação para o meio ambiente devida as suas características, como elevada demanda química e biológica de oxigênio, turbidez, óleos e gorduras, sólidos suspensos, fósforo e nitrogênio elevados (PRAZERES et al., 2013; PRAZERES et al., 2014; PRAZERES et al., 2016).

Altos valores de matéria orgânica e nutrientes presentes nas águas residuais de soro de leite podem levar ao consumo excessivo de oxigênio, eutrofização e toxicidade em corpos d'água receptores se o efluente for descartado sem tratamento (FERREIRA et al., 2021).

Os tratamentos mais utilizados para águas residuais de soro de leite são os processos de oxidação avançada, físico químicos e biológicos. No processo de oxidação avançada é utilizado oxidantes fortes, tornando o tratamento dependente em termos de segurança e custo. No processo físico químico é necessária uma elevada adição de produtos químicos que aumenta o custo do processo e torna os processos posteriores complexos, elevando o risco de contaminação secundária (TAHREEN et al., 2020).

O tratamento biológico mais utilizado para águas residuais de soro de leite é digestão anaeróbia que se destaca por ser uma opção ecologicamente correta devida à redução biológica de compostos orgânicos em biogás, contudo, esse tratamento demonstra algumas desvantagens, como condições estritamente controladas com longos tempos de retenção, remoção de

nitrogênio e fósforo insatisfatórias e efluente com qualidade insuficiente para atender os padrões ambientais, necessitando de um pós-tratamento (PRAZERES et al., 2016; CHARALAMBOUS et al., 2020; FERREIRA et al., 2021; TAHREEN et al., 2020; CHERNICHARO, 2008).

Os processos eletroquímicos demonstram ser uma boa opção de pós-tratamento ao tratamento anaeróbio. Dentre os processos eletroquímicos, a eletrocoagulação se destaca como uma alternativa sustentável para o tratamento de efluentes devida a utilização de equipamento de fácil operação e baixos níveis de lodo. Apesar das vantagens, o tratamento eletrolítico apresenta algumas desvantagens, como: consumo de ânodo e cátodo, necessitando de uma substituição regular; necessidade de fonte de energia e o fato do efluente após tratamento apresentar elevada concentração de alumínio e ferro, necessitando de pós tratamento ao tratamento de eletrocoagulação (TAHREEN et al., 2020; UN et al., 2014; SEGURA et al., 2018; REILLY et al., 2019).

O Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos (PPGCTA), apresenta a linha de pesquisa de processos biotecnológicos e não convencionais na produção de alimentos e ingredientes, na qual está contemplado o projeto de pesquisa de desenvolvimento de produtos e processos para a indústria de alimentos. Nesse projeto, trabalhos anteriores foram desenvolvidos com o objetivo de estudar tratamentos para efluentes da indústria de laticínios e efluente de soro de leite, entre eles, processos eletrolíticos, processos de separação por membranas e tratamento anaeróbio, contudo, não foram encontrados trabalhos que relacionassem a utilização de tratamento eletrolítico após o tratamento anaeróbio em efluente oriundo do processamento do soro de leite.

Diante desse contexto, o presente trabalho inicia as pesquisas com a utilização de um sistema anaeróbio e após um tratamento com eletrocoagulação para o efluente do soro de leite, objetivando avaliar, se a eletrocoagulação, como método de pós tratamento anaeróbio de efluente gerado no processamento do soro de leite é eficaz na remoção de DQO e fósforo.

Para alcançar o objetivo principal, os seguintes objetivos específicos foram delineados:

- a) caracterizar o efluente do soro de leite antes e após tratamento anaeróbio, avaliando a remoção de DQO em função da temperatura;
- b) avaliar a eficiência da eletrocoagulação na remoção de DQO e fósforo;
- c) avaliar as possibilidades de reuso do efluente tratado pelos sistemas anaeróbio e eletrolítico.

Este trabalho está estruturado em 4 capítulos, conforme especificado a seguir:

No capítulo 2, é apresentado o artigo de revisão bibliográfica do presente trabalho. O artigo intitulado: “*Pós tratamento por eletrocoagulação de efluente do processamento do soro de leite tratado por reator anaeróbio*”, que aborda as principais características do soro de leite e do efluente de soro de leite, assim como tratamentos utilizados para o efluente oriundo do beneficiamento do soro de leite.

No capítulo 3, é apresentado o artigo científico, fruto das atividades experimentais realizadas no presente trabalho.

No capítulo 4, são apresentadas as conclusões gerais e as sugestões para trabalhos futuros.

2 PÓS TRATAMENTO POR ELETROCOAGULAÇÃO DE EFLUENTE DO PROCESSAMENTO DO SORO DE LEITE TRATADO POR REATOR ANAERÓBIO

Artigo publicado na revista: Research, Society and Development, v.9, n.9, 2020. DOI:

<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i3.7509>

Camila Favretto de Souza^{1*}, Marcelo Hemkemeier^{1*}

¹ Universidade de Passo Fundo (UPF), Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária (FAMV), Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos (PPGCTA), Passo Fundo-RS, Brasil

*Autores correspondente: camila.favretto@hotmail.com e marceloh@upf.br

Resumo

O soro de leite é um subproduto da fabricação de queijo, rico em proteína, lactose e minerais, que pode ser processado e agregado a novos produtos. Da valorização desse subproduto gera-se um efluente, rico em matéria orgânica, que se não devidamente tratado antes do descarte nos recursos hídricos, causa impactos ambientais. A digestão anaeróbia destaca-se no tratamento desse efluente, pois apresenta bons resultados na remoção da carga orgânica, é de fácil manuseio, não necessita de muito espaço e gera biogás, que pode ser utilizado para obtenção de energia na indústria. No entanto, a digestão anaeróbia não proporciona boa remoção de poluentes persistentes, como o nitrogênio e fósforo, sendo necessário aplicação de pós-tratamento. A eletrocoagulação surge como um método para a remoção desses nutrientes, pois não necessita de controle de pH, demanda menor energia e tem baixa produção de lodo. Trabalhos anteriores foram desenvolvidos com o objetivo de estudar tratamentos para efluentes da indústria de laticínios e indústrias de processamento de soro de leite através de tratamentos anaeróbios ou eletrocoagulação, contudo, não tiveram estudos que relacionassem a utilização da eletrocoagulação após o tratamento anaeróbio. Com isso, esse trabalho objetiva abordar um review acerca do desenvolvimento e aplicação de métodos anaeróbios como alternativa para o tratamento do efluente obtido no beneficiamento do soro de leite, mostrando a eficiência do tratamento na remoção de DQO e após a aplicação de eletrocoagulação, visando avaliar se esse método de pós tratamento ao tratamento anaeróbio é eficaz como a remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo.

Palavras-chave: Soro de leite; Tratamento anaeróbio; Eletrocoagulação.

Abstract

Whey is a by-product of cheese making, rich in protein, lactose and minerals, which can be processed and added to new products. The valorization of this by-product generates an effluent, rich in organic matter, which, if not properly treated before disposal in water resources, causes

environmental impacts. Anaerobic digestion stands out in the treatment of this effluent, as it presents good results in the removal of organic load, is easy to handle, does not require much space and generates biogas, which can be used to obtain energy in industry. However, anaerobic digestion does not provide good removal of persistent pollutants, such as nitrogen and phosphorus, requiring the application of post-treatment. Electrocoagulation appears as a method for removing these nutrients, as it does not require pH control, requires less energy and has low sludge production. Previous studies were developed with the objective of studying treatments for effluents from the dairy industry and whey processing industries through anaerobic treatments or electrocoagulation, however, there were no studies that related the use of electrocoagulation after anaerobic treatment. With this, this work aims to approach a review about the development and application of anaerobic methods as an alternative for the treatment of the effluent obtained in the processing of whey, showing the efficiency of the treatment in the removal of COD and after the application of electrocoagulation, aiming to evaluate whether this method of after treatment to anaerobic treatment is effective as the removal of nutrients such as nitrogen and phosphorus.

Keywords: Whey; Anaerobic treatment; Electrocoagulation.

Resumen

El suero es un subproducto de la elaboración del queso, rico en proteínas, lactosa y minerales, que se puede procesar y agregar a nuevos productos. La valorización de este subproducto genera un efluente, rico en materia orgánica, que si no se trata adecuadamente antes de su disposición en los recursos hídricos, genera impactos ambientales. En el tratamiento de este efluente destaca la digestión anaeróbica, ya que presenta buenos resultados en la remoción de carga orgánica, es fácil de manejar, no requiere mucho espacio y genera biogás, que puede ser utilizado para obtener energía en la industria. Sin embargo, la digestión anaeróbica no proporciona una buena eliminación de contaminantes persistentes, como el nitrógeno y el fósforo, que requieren la aplicación de un postratamiento. La electrocoagulación aparece como un método de eliminación de estos nutrientes, ya que no requiere control de pH, requiere menos energía y tiene poca producción de lodos. Se desarrollaron estudios previos con el objetivo de estudiar tratamientos para efluentes de la industria láctea e industrias procesadoras de suero mediante tratamientos anaeróbicos o electrocoagulación, sin embargo, no existieron estudios que relacionaran el uso de la electrocoagulación después del tratamiento anaeróbico. Con ello, este trabajo pretende abordar una revisión sobre el desarrollo y aplicación de métodos anaeróbicos como alternativa para el tratamiento del efluente obtenido en el procesamiento del suero,

mostrando a eficiência do tratamento na remoção de DQO e posterior a aplicação de electrocoagulação, com o fim de avaliar se este método de postratamento ao tratamento anaeróbico é eficaz como a eliminação de nutrientes como o nitrogênio e o fósforo.

Palabras clave: Suero de leche; Tratamiento anaeróbico; Electrocoagulación.

1. Introdução

O soro de leite é um subproduto das indústrias de laticínio, extraído da coagulação do leite no processo de fabricação do queijo e representa de 80-90% do volume total de leite utilizado, sendo considerado como o poluente mais importante das águas residuais de laticínios, devido a sua elevada carga orgânica, proveniente de gorduras, lactose e minerais, assim como, pelo volume gerado (Nunes et al., 2018; Un et al., 2014; Carvalho et al., 2013).

Segundo Marquardt et al. (2011), 40% do soro de leite produzido no Brasil é descartado sem tratamento adequado, transformando-se em um rejeito industrial nocivo a natureza e causando impactos ambientais, como a contaminação biológica e a eutrofização de rios, devido ao excesso de nutrientes como fósforo e nitrogênio além de elevada DQO, levando a perda de vida aquática, assim como, podendo atrair moscas e mosquitos que transmitem doenças perigosas devida a liberação de odores desagradáveis durante sua decomposição (Reilly et al., 2019; Tirado et al., 2018).

Atualmente o soro de leite deixou de ser considerado um resíduo e passou a ser tratado com subproduto pelas indústrias de beneficiamento, mas mesmo após esse processo ainda resta um efluente a ser tratado (Vettorello et al., 2017). A conscientização social a respeito dos descartes inadequados desse efluente tem forçado as indústrias a tratarem de forma eficiente esse resíduo gerado no beneficiamento do soro de leite para posterior descarte devida a sua elevada carga orgânica e de nutrientes (Rivas et al., 2011).

Os métodos de tratamento de efluentes com elevada carga orgânica podem ser aeróbios ou anaeróbios, no entanto, os métodos aeróbios demandam alto consumo de energia para o tratamento. Os métodos anaeróbios não apenas removem grande quantidade de Demanda Química de Oxigênio (DQO), como produzem biogás, que pode ser aproveitado pela indústria para a geração de energia, mas esse sistema não remove nutrientes sendo então necessário um pós-tratamento (Spachos et al., 2011). A eletrocoagulação surge como possível método de pós-tratamento por ser mostrar eficaz na remoção de poluentes, reduzindo o volume de lodo gerado e utilizando baixa energia e baixo custo operacional.

Dessa forma, esse trabalho aborda um review acerca do desenvolvimento e aplicação de métodos anaeróbios como alternativa para o tratamento do efluente obtido no beneficiamento

do soro de leite, mostrando a eficiência do tratamento na remoção de DQO e após a aplicação da eletrocoagulação visando a remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo.

2. Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida de forma bibliográfica, qualitativa e os dados foram obtidos através de artigos, dissertações, livros e meios digitais. O artigo está organizado em 5 partes, introdução, metodologia, revisão bibliográfica, onde aborda as características do soro de leite, processo de beneficiamento e valorização, efluente do soro de leite e tratamentos. A quarta parte trata a respeito da eletrocoagulação, trazendo as vantagens e desvantagens da mesma, e por final, na quinta parte, as conclusões finais (Pereira et al., 2018).

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.2 Características do soro de leite

O queijo é o produto que tem apresentado maiores taxas de crescimento nos últimos anos no Brasil. Entre os anos de 2005 a 2016, houve um crescimento de 124% no volume total de queijo vendido e no ano de 2016, alcançou 785 mil toneladas vendidas. Devido sua variedade, praticidade e propriedades nutricionais, o queijo está cada vez mais presente na vida dos brasileiros, contando com mais de 70 tipos produzidos no Brasil (Embrapa, 2018).

Com a produção do queijo é gerado o soro de leite, que consiste em um subproduto lácteo das indústrias de laticínios e se apresenta como um líquido amarelo-esverdeado que permanece após a precipitação e remoção da caseína do leite. Este subproduto representa de 80 a 90% do volume de leite utilizado na fabricação do queijo e contém aproximadamente 55% dos nutrientes do leite, incluindo proteínas, lactoses, vitaminas, minerais e geralmente apresenta baixo pH e alcalinidade (Gajo et al., 2016; Prazeres et al., 2012; Vettorello et. al., 2017; Magalhães et al., 2011; Un et al., 2014; Iltchenco et al., 2018; Nunes et al., 2018; Rico et al., 2015; Dereli et al., 2019).

Dependendo do tipo de queijo fabricado e das enzimas utilizadas, o soro de leite pode ser classificado em soro de leite ácido ou doce. O soro de leite ácido é obtido após fermentação ou adição de ácidos orgânicos ou minerais e é um coproduto do processo de fabricação de produtos lácteos, como queijo cottage e iogurte coado. O soro de leite doce é obtido pela adição de enzimas proteolíticas como a quimosina e é produzido durante a fabricação do queijo tipo coalho, cheddar ou suíço. A composição e características do soro de leite dependem de fatores

como tipo de leite utilizado (cabra, ovelha, vaca, entre outros), alimentação do animal, época do ano e estágio de lactação (Carvalho et al., 2013; Ganju e Gogate, 2017).

No Quadro 1 é apresentada uma compilação dos autores a respeito das características do soro de leite.

Quadro 1: Características do soro de leite.

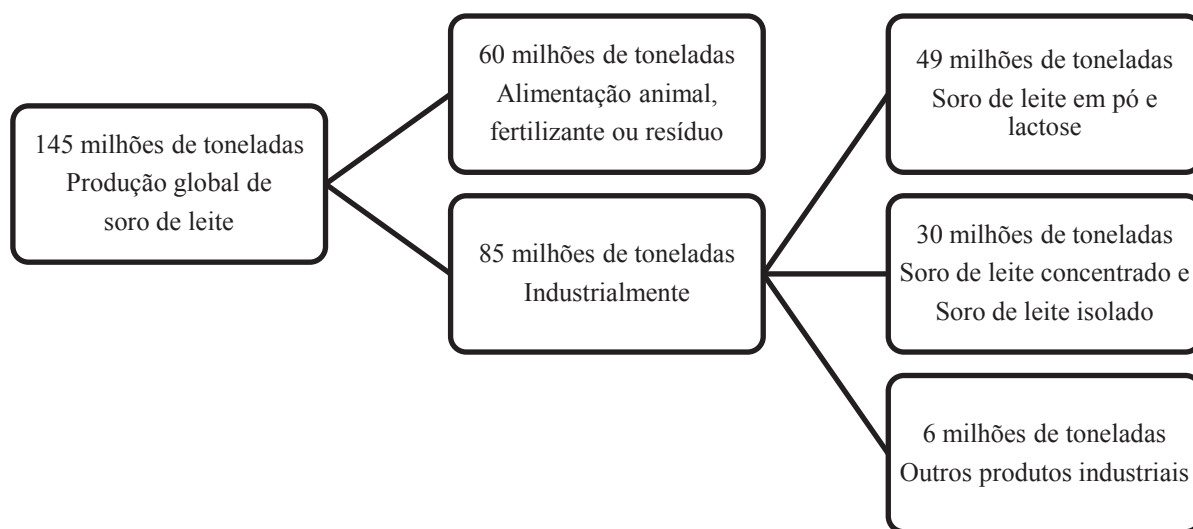
Referências	Frigon et al. (2009)	Spachos e Stamatis (2011)	Marquardt et al. (2011)	Prazeres et al. (2012)	Rico et al. (2015)	Ganju e Gogate (2017)	Itchenco et al. (2018)	Nunes et al. (2018)	Média
Água (%)	-	94	93-94	93-94	-	93-95	-	93-94	93-95
DBO (g L ⁻¹)	-	-	-	27,0-60,0	-	-	-	-	27,0-60,0
DQO (g L ⁻¹)	50-70	-	-	50-102	55,7-59,3	-	-	-	50,0-102,0
Gordura (%)	-	<0,1	-	0,99-10,5 g L ⁻¹	-	-	-	-	<0,1% ou 0,99-10,58 g L ⁻¹
Lactose (%)	70-75	4,5-5,0	4,5-5,0	39-60 g L ⁻¹	60,0-80,0	3,8-5,0	4,66	4,4-5,0	3,8-80,0% ou 39-60 g L ⁻¹
Minerais (%)	-	<0,1	0,6-1,0	0,46-10,0	-	0,5-0,7	0,6	0,6-1,0	0,1-10,0
pH	-	4,5-5,0	6,82	3,8-6,5	-	4,6-6,4	6,49	-	3,8-6,82
Proteínas (%)	10-15	0,8-1,0	0,7-0,9	1,4-8,0 g L ⁻¹	10,0-20,0	0,8-1,0	0,91	0,7-0,9	0,7-20,0% ou 1,4-8,0 g L ⁻¹
Nitrogênio (g L ⁻¹)	-	-	-	0,2-1,76	0,85-1,39	-	-	-	0,2-1,76
Fósforo (g L ⁻¹)	-	-	-	0,124-0,54	0,189-0,217	-	-	-	0,124-0,54
Sólidos Totais (%)	-	-	-	-	5,0-8,0	-	5,6	-	5,0-8,0

Fonte: Autor (2020).

De acordo com o Quadro 1 percebemos que o soro de leite possui uma elevada carga orgânica, devida a quantidade de lactose, proteína e gorduras. Estas características estão representadas pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em torno de 27,0 a 60,0 g L⁻¹ e a Demanda Química de Oxigênio (DQO) em torno de 50 a 102 g L⁻¹. De acordo com Nunes et al., (2018), cerca de 40% do soro de leite produzido no Brasil é descartado de forma incorreta, principalmente pelas pequenas e médias empresas, transformando-se em um rejeito nocivo a natureza se descartado sem o devido tratamento e causando impactos ambientais (Nunes et al., 2018; Carvalho et al., 2013).

A indústria de fabricação de queijo é responsável pelos três principais tipos de efluentes. O soro de leite (resultante da produção de queijo), o segundo soro de leite (resultante da produção de queijo cottage) e soro de leite com águas residuais, onde a água de lavagem de tubulações e armazenamentos se misturam com frações de soro de leite e segundo soro de leite. Na Figura 1 é apresentada a utilização global do soro de leite (Carvalho et al., 2013; Prazeres et al., 2012).

Figura 1: Utilização global do soro de leite.



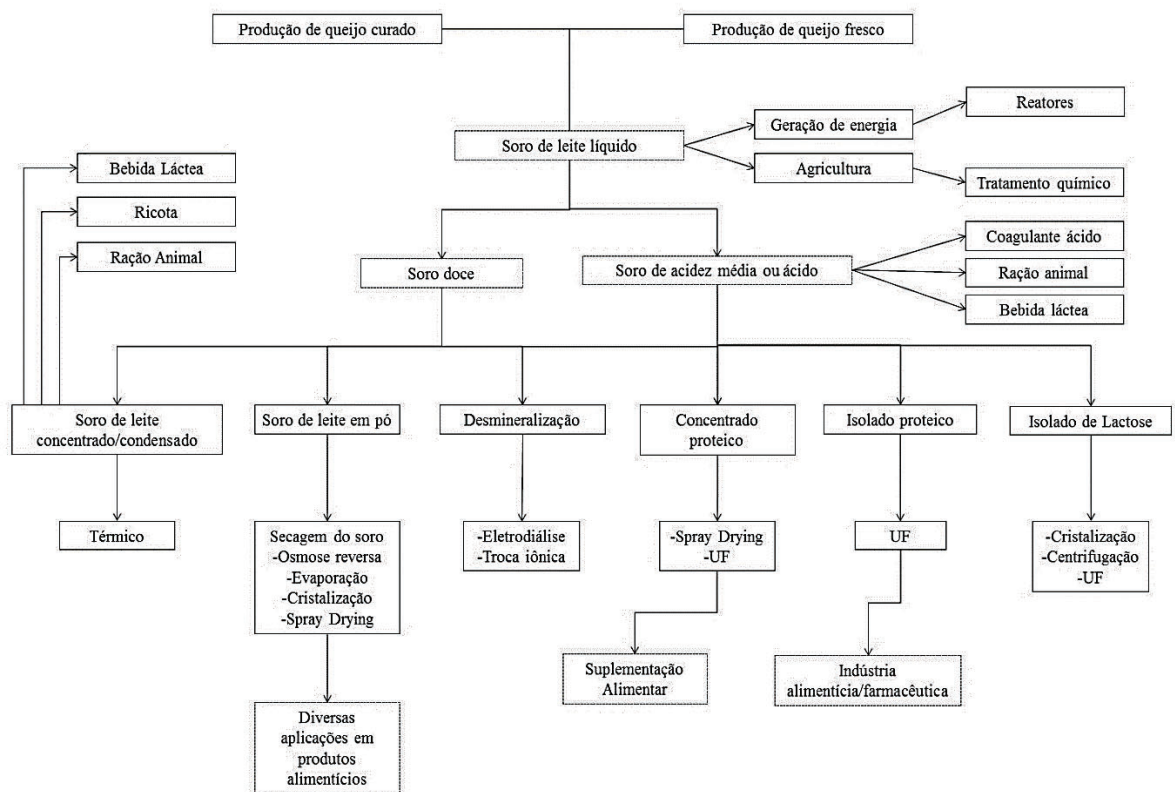
Fonte: Adaptado de Ganju e Gogate (2017).

De acordo com Ganju e Gogate (2017), a utilização global do soro de leite é de 145 milhões de toneladas, sendo 41,38% utilizado para alimentação animal, fertilizante ou resíduo e 58,62% utilizado industrialmente. Desses 58,62% utilizado industrialmente, 33,79% são destinadas a produção de soro de leite em pó e lactose, 20,69% em soro de leite concentrado e soro de leite isolado, e 4,14% em outros produtos industriais.

2.1.3 Beneficiamento e valorização do soro de leite

Atualmente o soro de leite deixou de ser considerado resíduo e passou a ser tratado como subproduto, possibilitando que seu beneficiamento tenha grande importância econômica, devido a suas características nutricionais, médicas e cosméticas o que intensifica o interesse na valorização de acordo com a Figura 2 (Vettorello et al., 2017; Prazeres et al., 2012; Domingues et al., 2010; Gajo et al., 2016).

Figura 2: Processo de beneficiamento do soro de leite.



Fonte: Adaptado de Nunes et al. (2018).

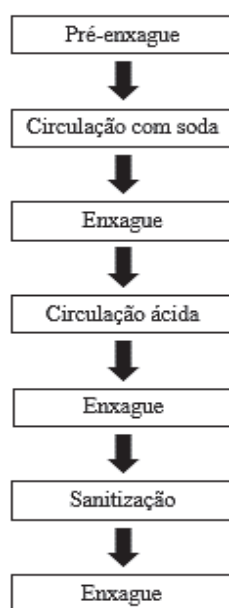
O soro de leite pode ser valorizado quando é utilizado como matéria-prima de novos produtos, sendo que o seu aproveitamento está associado a alimentação humana, animal, geração de energia e reuso na agricultura. Na Figura 2, é apresentado o processo de beneficiamento do soro de leite, onde após a fabricação do queijo, o soro é enviado para indústrias de processamento, sendo transformado em soro modificado, concentrado ou em pó. Essa valorização melhora a vida útil dos produtos e diminui o volume enviado para os sistemas de tratamento, contudo ainda resta um efluente a ser tratado (Nunes et al., 2018; Gajo et al., 2016).

2.2 Efluente do soro de leite

A disponibilidade de água para a produção de alimentos depende cada vez mais do gerenciamento e uso sustentável da água em todos os setores, devida a sua escassez causada pelas mudanças climáticas e aumento populacional. A indústria de alimentos é responsável por 30% do consumo de água e de acordo com os regulamentos sobre higiene alimentar, apenas água potável pode ser utilizada para superfícies de contato com alimentos e limpeza de equipamentos (Meneses e Flores, 2016).

A operação de unidade Clean-In-Place (CIP) é amplamente utilizada nas indústrias de alimentos para a circulação de soluções químicas e enxagues com água, por meios mecânicos sobre as superfícies a serem limpas e é usada globalmente como padrão de limpeza, de acordo com a Figura 3.

Figura 3: Sistema CIP de limpeza.



Fonte: Adaptado de Brum et al. (2009).

Na Figura 3, Brum et al., (2009), descreve as etapas que envolvem o sistema CIP de limpeza, de acordo com o Sistema Brasileiro de Respostas Técnicas (SBRT), onde é feita a utilização de ácidos, sodas e sanitizantes para a limpeza dos mesmos, alterando com recirculações de água para então ser inserido o produto.

As águas residuais provenientes do soro de leite são constituídas por diferentes diluições, que contém geralmente produtos químicos ácidos e alcalinos utilizados no processo de lavagem e as características deste efluente depende de fatores como, produtos finais, tipo de sistema, método de operação, gestão de águas residuais e clima (Prazeres et al., 2013). No

Quadro 2 é apresentada uma compilação dos autores a respeito das características do efluente do soro de leite.

Quadro 2: Características do efluente do soro de leite.

Parâmetros	Fang (1991)	Kalyuzhnyi et al. (1997)	Frigon et al. (2009)	Rivas et al. (2010)	Rivas et al. (2011)	Prazeres et al. (2013)	Un et al. (2014)	Prazeres et al. (2016)	Tirado et al. (2018)	Média
Condutividade (dS m ⁻¹)	-	-	-	11,25-13,47	-	-	17,0	7,35-11,25	15,5	7,35-17,0
DBO (g L ⁻¹)	0,59-1,21	-	2,7	10-12,5	13,3-16,3	6,9-12,9	-	5,88-1,24	-	0,59-16,3
DQO (g L ⁻¹)	1,07-2,18	5,4-77,3	3,9-3,91	0,09-25,58	17,1-19,9	9,3-18,5	15,5	7,42-17,71	-	1,07-77,3
Fósforo (g L ⁻¹)	-	-	0,015-0,025	0,0066-0,0072	0,0063-0,0069	0,103	-	0,089-0,117	-	0,0063-0,117
Lactose (g L ⁻¹)	-	-	2,8-2,82	0,18	0,18	-	-	-	-	0,18-2,82
Óleos e Graxas (g L ⁻¹)	-	0,4-5,7	-	1,83-3,76	-	-	-	-	-	0,4-3,76
pH	5,0-9,0	4,3-8,7	-	4,01-4,55	-	-	5,2	3,39-4,95	5,64	3,39-9,0
Proteínas (g L ⁻¹)	-	2,3-33,5	-	938-947 µg/L	937-949 µg/L	-	-	-	-	2,3-33,5 g L ⁻¹ ou 937-949 µg/L
Nitrogênio Total (g L ⁻¹)	0,029-0,19	0,5-5,6	75-115	0,31-0,35	0,32-0,36	-	-	0,250-0,378	1,106	0,029-115
Sólidos Suspensos Totais (g L ⁻¹)	0,081-0,441	-	-	1,63-4,78	-	-	-	1,35-1,80	5,88	0,081-5,88
Sólidos Totais (g L ⁻¹)	-	-	-	7,02-8,35	7,05-8,25	5,7-15,1	-	3,71-14,33	-	3,71-15,1
Turbidez (NTU)	-	-	-	1331-2004	1112-1550	405-1386	-	254,3-1310,3	6978	254,3-6978

Fonte: Autor (2020).

No Quadro 2, observamos que o alto valor da matéria orgânica é causado pela lactose, conteúdo de proteínas e gorduras, nos intervalos de (g L^{-1}) 0,18-2,82; 2,3-33,5; 0,4-3,76, respectivamente, que podem ser monitorados pela DQO 1,07-77,3 g L^{-1} e DBO 0,59-16,3 g L^{-1} . As proteínas do efluente do soro de leite envolvem principalmente a beta-lactoglobulina e α -lactoalbumina que tem alta afinidade pela água e não precipitam com a caseína durante o processo de fabricação do queijo, já os lipídios podem causar problemas operacionais devido ao potencial de flutuação da biomassa (Prazeres et al., 2012; Lin et al., 2014).

O alto teor de nitrogênio (0,029-115 g L^{-1}) e fósforo (0,0063-0,117 g L^{-1}) presente nos efluentes do soro de leite, tem como principal problema a eutrofização de corpos d'água, que acaba gerando problemas na qualidade da água, perda de animais vivos e possíveis efeitos subletais das toxinas das algas em animais e seres humanos. O excesso de nitrato e fosfato também afetam o ecossistema, pois ajudam no crescimento dramático de algas nas águas continentais e costeiras, já o flúor em excesso leva a doenças como fluorose e artrite (Kajjumba et al., 2019; Tehrani et al., 2019; Segura et al., 2017)

A turbidez é causada pela presença de materiais sólidos em suspensão e organismos microscópicos. A turbidez em torno de 254,3-6978 NTU causa a diminuição da passagem de luz na água reduzindo a fotossíntese dos organismos (algas e vegetação submersa), podendo comprometer a reprodução de peixes e invertebrados (Kim, 2011).

Prazeres et al. (2012), considera que além da valorização, os tratamentos biológicos e físico químicos também podem ser aplicados no gerenciamento do soro de leite.

2.2.1 Tratamentos para efluente oriundo do beneficiamento do soro de leite

Os processos biológicos podem ser realizados por meio de digestão aeróbia e anaeróbia, a diferença está no uso de microrganismos que dependem ou não de oxigênio (Nunes et al., 2018).

O conteúdo orgânico extremamente alto das águas residuais do soro de leite torna a aplicação do tratamento aeróbio, caracterizado pela degradação da matéria orgânica em temperatura ambiente (22 a 24°C) inadequada, principalmente devido ao custo de suplementação de oxigênio. A digestão anaeróbia é comumente considerada como o único método viável de tratamento de águas residuais com elevada carga orgânica, e pode ser

realizada com a utilização de reatores do tipo anaeróbio de manta de lodo (UASB) e de reatores de tanque continuamente agitado que têm a capacidade de recebimento de grande quantidade de carga orgânica, apresentam alta taxa de decomposição, e os poluentes podem ser convertidos em produtos finais gasosos, principalmente dióxido de carbono e metano, que podem ser utilizados como fonte alternativa de energia (Cuff et al., 2018; Rajeshwari et al., 2000; Dereli et al., 2019; Chernicharo, 2008; Prazeres et al., 2012; Hamdi et al., 2008; Carvalho et al., 2013).

Calcula-se que 90-95% do carbono contido no efluente bruto seja convertido em biogás, o restante vai para o efluente tratado. Essa tecnologia não visa a remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo, no entanto, o tratamento físico químico tem se mostrado eficiente na remoção dos mesmos (Spachos; Stamatis, 2011).

Devido ao alto teor de lactose nas águas residuais do soro de leite e baixa alcalinidade, as usinas de biogás geralmente dependem de um sistema robusto de controle de pH e/ou configurações adequadas de biorreatores. No Quadro 3 são apresentadas as vantagens e desvantagens do tratamento anaeróbio.

Quadro 3: Vantagens e desvantagens do tratamento anaeróbio.

Vantagens	Desvantagens
Baixa produção de sólidos, cerca de 2 a 8 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios;	Remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos insatisfatória;
Baixo consumo de energia, usualmente associado a uma elevatória de chegada. Isso faz com que os sistemas tenham custos operacionais muito baixos;	Produção de efluente com aspecto desagradável e usualmente com qualidade insuficiente para atender os padrões ambientais. Em decorrência, alguma forma de pós tratamento é normalmente necessária;
Baixa demanda de área;	Possibilidade de distúrbios devido a choques de carga orgânica e hidráulica, presença de compostos tóxicos ou ausência de nutrientes;
Baixos custos de implantação, da ordem de 20 a 30 dólares per capta;	A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser mais estudadas;
Produção de metano, um gás combustível de alto teor calorífico;	A partida do processo pode ser lenta, na ausência de lodo de sementeira adaptado;
Possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses;	Possibilidade de geração de maus odores e de problemas de corrosão, porém controláveis.
Tolerância a elevadas cargas orgânicas, Aplicabilidade em pequena e grande escala e baixo consumo de nutrientes.	

Fonte: Chernicharo (2008).

Analisando o Quadro 3, destacamos que o tratamento anaeróbio além de demandar pouca área, tem um baixo custo de implantação e mesmo o reator ficando sem alimentação a biomassa consegue se preservar por vários meses.

Apesar da alta biodegradabilidade do efluente do soro de leite, eles são considerados um substrato problemático para o tratamento anaeróbio devido sua elevada DQO rapidamente acidificável, teor de sal, cálcio e falta de alcalinidade, sendo então necessária uma suplementação de alcalinidade especialmente durante o início do reator e períodos de alta carga orgânica (Dereli et al., 2019).

Fang (1991) utilizou duas plantas para tratar o efluente do soro de leite, uma planta de lodo ativado em três estágios e um reator anaeróbio. Cada planta piloto tratou continuamente 230 L/h de efluente e o lodo anaeróbio levou cerca de 6 semanas para se aclimatar.

O reator UASB utilizado por Diamantis et al. (2014) para tratar soro de leite diluído com água de lavagem de plantas, comportava 2L de volume e a temperatura era regulada em de 30°C (± 1) durante todo o período experimental, assim como o pH em 6,4 ($\pm 0,05$) e o lodo granular utilizado tinha as mesmas características do efluente com recirculações diárias.

O'Flaherty et al. (2006) tratou efluente do soro de leite com dois reatores anaeróbios em escala piloto, um com efluente de baixa resistência (1 kg m^{-3} de DQO) e outro de alta resistência (1 kg m^{-3} de DQO). Ao baixar a temperatura do efluente de alta resistência para 12°C, houve diminuição na eficiência de remoção de DQO, entre 50% e 60% e uma desintegração do lodo granular.

Hamdi et al. (2008) utilizou um reator de filtro anaeróbio a montante com capacidade de 2L e temperatura de 35°C para tratar o efluente do soro de leite e a maior taxa de remoção foi em 4 dias, alcançando 90%.

Frigon et al. (2009) desenvolveram um estudo com o objetivo de avaliar o tratamento de efluente do soro de leite com carga orgânica variada. O sistema de tratamento ocorreu por processo anaeróbio, seguido por um polimento aeróbio. Para esse procedimento os autores projetaram um digestor em escala piloto. O aumento na aeração durante a etapa aeróbia não fez com que o desempenho geral do tratamento melhorasse. Dessa forma, concluiu-se que, o acoplamento de passos aeróbios e anaeróbios no mesmo digestor é promissor, porém, são necessários mais de dois dias para remover eficientemente a fração biodegradável das águas residuais de soro.

Rivas et al. (2010) utilizou o processo de coagulação-floculação para tratar o efluente do soro de leite, sendo utilizados 3 diferentes coagulantes: sulfato ferroso (FeSO_4), sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) e cloreto férrico (FeCl_3). O $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ não teve resultados significativos, devido ao fato do sulfato de alumínio necessitar da utilização de uma quantidade maior que os demais para atingir os mesmos resultados.

O estudo de tratamento aeróbio de efluente do soro de leite pré-coagulado com NaOH ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$ foi desenvolvido por Rivas et al., (2011). O lodo gerado na pré-coagulação apresentou propriedades de sedimentação aceitáveis, embora os sólidos do efluente tratado com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é melhor separado do líquido do que aqueles formados em águas residuais processadas com NaOH. Conforme os parâmetros cinéticos biológicos, em ambos os pré-tratamentos, a fase de pré-coagulação tornou o sobrenadante mais propenso à biodegradação do que o efluente não tratado, pois a geração de lodo após processos biológicos é reduzida.

O efluente do soro de leite foi tratado por Carvalho et al. (2013) utilizando oxidação por Fenton. No estudo em questão antes do processo de Fenton o efluente foi submetido a dois pré-tratamentos, sendo eles: nº 1- coagulação e floculação com FeCl_3 ; nº 2- precipitação utilizando $\text{Ca}(\text{OH})_2$ com digestão aeróbia. Nesse segundo tratamento o efluente saiu relativamente limpo e adequado para outros usos.

Segundo Carvalho et al. (2013) a aplicação de processos oxidativos avançados (POAs) após processos químicos e/ou biológicos podem constituir um meio viável e alternativa promissora para eliminar a matéria orgânica do efluente, mas devido ao alto custo operacional associado ao uso de reagentes caros e a possibilidade de formação de compostos tóxicos, buscam-se outras alternativas para o tratamento do efluente do soro de leite de acordo com a Quadro 4 (Araujo et al., 2016).

Quadro 4: Tratamentos utilizados para efluente do soro de leite e principais resultados.

Referência	Tratamentos utilizados	Principais resultados
Fang (1991)	Lodo ativado e reator anaeróbio	O tratamento com lodo ativado teve uma remoção de 99% na DBO e 91% no nitrogênio com 19,8 horas de retenção. O reator anaeróbio reduziu 87% da DBO após 2 dias de retenção.
Diamantis et al. (2014)	Reator UASB	Remoção de 90% na DQO.
O'Flaherty et al. (2006)	Tratamento anaeróbio	No reator tratado com efluente de baixa resistência, a remoção de DQO em média de 70 a 80%. No efluente de alta resistência, excedeu 90 % de remoção, ambos com temperatura entre 20 e 12°C.
Hamdi et al. (2008)	Reator anaeróbio	Remoção de 80 a 90% na DQO.
Frigon et al. (2009)	Digestão anaeróbia e aeróbio	Remoção de 97% na DQO.
Rivas et al. (2010)	Coagulação-floculação	Ao utilizar FeSO_4 , houve uma redução de 50% na DQO e 60% na DBO, FeCl_3 foi semelhante ao FeSO_4 , alcançando uma redução de 40% na DQO e 60% na DBO e $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ não teve resultados significativos.
Rivas et al. (2011).	Tratamento aeróbio com pré-coagulação de NaOH ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Ambos os agentes reduziram 50% da DQO.
Carvalho et al. (2013)	Oxidação por fenton	O efluente submetido a coagulação e floculação com FeCl_3 e após oxidado por Fenton $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}(\text{III})$, reduziu a carga orgânica em 80%, já o tratado por precipitação com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, e digestão aeróbia, removeu quase o conteúdo total de DQO.

Fonte: Autor (2020).

De acordo com o Quadro 4 os tratamentos que demonstraram melhor eficiência na remoção de DQO em soro de leite foram os tratamentos anaeróbios, o que vem de encontro com os estudos realizados.

O tratamento biológico é importante pois remove grande parte da matéria orgânica presente no efluente. O tratamento anaeróbio pode ser implantado em pequena e grande escala com baixo custo de implantação, baixo consumo de energia e possibilidade da utilização do gás metano, produzido durante o tratamento, ser utilizado como fonte de energia, mas esse método tem dificuldade na remoção de nutrientes. O tratamento físico-químico por si só, não demonstra bons resultados no tratamento desse efluente, rico em lactose, DQO e DBO, mas é importante para a remoção de nutrientes. Dentre os tratamentos físico-químicos, destaca-se a eletrocoagulação.

2.3 Eletrocoagulação

A eletrocoagulação (EC) está diretamente relacionada ao processo de coagulação via separação de fases para descontaminação de águas residuais antes do processo de descarga no ambiente. A EC é uma tecnologia eletroquímica que visa a redução de poluentes na água, assim como metais tóxicos e poluentes orgânicos persistentes e sua eficiência depende de parâmetros como condutividade e pH. Uma condutividade maior no fluxo de águas residuais, reduz a resistência do circuito de eletrólise, diminuindo a tensão necessária para tratar a carga e consequentemente diminuindo o consumo elétrico do processo (Un et al., 2014; Segura et al., 2017; Reilly et al., 2019).

O equipamento de EC consiste em eletrodos de cátodo e ânodo alimentados por corrente contínua, submersos em um tanque que contém uma solução contaminada. Esses eletrodos podem variar em forma, tamanho e número, mas os metais mais utilizados para a fabricação dos eletrodos de EC são de Al e Fe, pois são econômicos, amplamente disponíveis e não perigosos. O sistema de EC pode ser operado em batelada ou em modo contínuo (Reilly et al., 2019; Melchioris et al., 2016).

De acordo com Reilly (2019), a eletrólise é usada na EC para causar a dissolução do ânodo de metal (sacrifício) nas águas residuais, expressa pelas Equações 1, 2 e 3:

No ânodo:

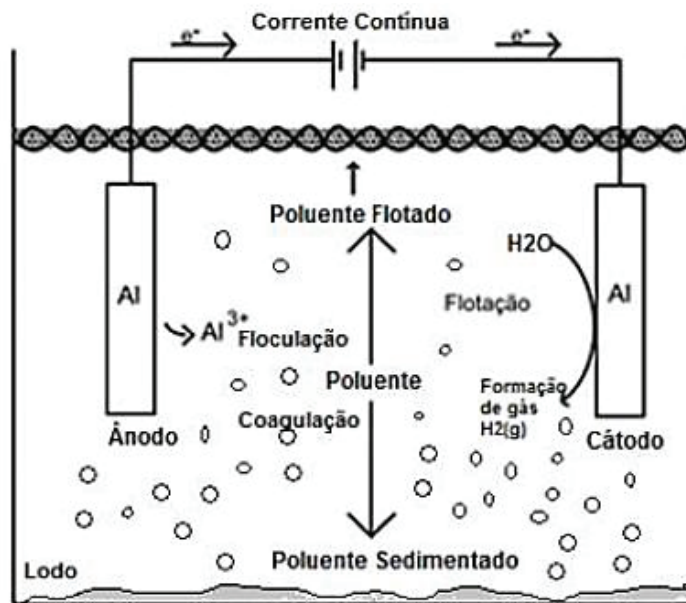


No cátodo:



Na Figura 4 é apresentada uma representação esquemática de um reator de EC.

Figura 4: Representação esquemática de um reator de EC.



Fonte: Melo (2018).

De acordo com a Figura 4, observamos que o fluxo de íons metálicos do ânodo de sacrifício atua como um agente coagulante para a ligação de contaminantes. Em solução, os íons Al^{3+} e Fe^{2+} reagem com os grupos OH^- para formar hidróxidos, que ligam os contaminantes por complexação ou atração eletrostática. A dispersão do coagulante é auxiliada por uma agitação mecânica rápida e a liberação de bolhas de gás na célula da EC auxilia no processo de tratamento, fornecendo flutuabilidade para alguns contaminantes coagulados, o que faz com que eles flutuem para a superfície, de onde podem ser removidos, conforme a Figura 4 (Reilly et al., 2019; Tirado et al., 2018).

As espécies dominantes de íons Al e Fe formadas são determinadas pelo pH do fluxo de resíduos. Ao usar eletrodos de Al, um excesso de cátions Al^{3+} é formado em $pH < 4,0$. $Al(OH)_3$ é principalmente ativo entre $pH 4-12$ e os ânions de aluminato são dominantes em pH acima de

12. A valência do Fe dissolvido pode ser controlada pelo pH e usada para prever a formação de coagulantes de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ou $\text{Fe}(\text{OH})_3$ na solução. Os íons Fe^{2+} são altamente solúveis e, portanto, um pH alcalino é benéfico para sua oxidação em cátions trivalentes, ideais para a coagulação de contaminantes por Fe (Reilly et al., 2019).

A quantidade teórica de íons metálicos produzidos a partir do ânodo durante o processo de eletrocoagulação pode ser quantificada pela lei de Faraday, que é expressa pela Equação 4:

$$m = \frac{ITM}{FZ} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

I= corrente (A);

T= tempo do processo (s);

M= massa molar do metal do eletrodo (g/mol);

F= constante de Faraday (96,485 C/mol);

Z= valência do metal do ânodo.

A distância entre os eletrodos deve ser levada em consideração, pois à medida que a distância entre os eletrodos diminui, o movimento dos íons se torna mais fácil devida a redução da resistência, contudo, o consumo de energia diminui e a eficiência da remoção é aprimorada. Enquanto que o distanciamento dos eletrodos resulta numa dificuldade de movimentação dos íons, aumento da resistência, e conseqüentemente maior consumo de energia (Tehrani et al., 2019).

Os mecanismos envolvidos na EC ainda não são bem entendidos, mas visam a remoção de metais pesados e orgânicos.

Na remoção de orgânicos, depende da estrutura e grupos funcionais dos poluentes. Os principais mecanismos dos poluentes orgânicos são: complexação, neutralização de carga, aprisionamento e adsorção. Na complexação o poluente orgânico atua como ligante, sendo coordenado ao centro metálico por seus grupos funcionais e precipita dentro do bloco coagulante. Na neutralização ou desestabilização de cargas, a dupla camada de poluentes é comprimida, favorecendo a formação de agregados e então a precipitação. No mecanismo de aprisionamento fundamenta-se na captura de moléculas orgânicas nos coágulos hidroxometálicos que arrastam os poluentes com eles e a adsorção, que enquanto as moléculas orgânicas ficam presas, o poluente é fisicamente arrastado pelos coágulos, onde o poluente

apresenta interações físico-químicas que favorecem sua adsorção na superfície coagulante. A utilização de cada mecanismo depende da natureza do poluente orgânico, tipo de coagulante e sua dosagem (Segura et al., 2017).

Reilly et al. (2019), demonstrou em seu estudo a respeito da eletrocoagulação, a eficiência desse processo para remoção de nitrogênio, fósforo, turbidez e DQO em águas residuais de laticínio. Em estudos realizados pelo mesmo, foi utilizado ânodo de Al, corrente de $4,3 \text{ mA/cm}^2$ e tempo de retenção de 30 minutos, alcançando 81% de remoção de nitrogênio, 89% de remoção de fósforo e 61% de remoção de DQO. No mesmo estudo, foi relatada que a utilização do ânodo de Fe, com pH ajustado para 4,5, condutividade de $3,6 \text{ mA/cm}^2$ e tempo de retenção de 60 minutos obteve-se uma remoção de 90% na turbidez e DQO.

Em um estudo sobre efluente de soro de leite, Segura et al. (2017) utilizou um eletrodo de ferro, com pH de 4,5 e condutividade de 60 mA/cm^2 , obtendo uma remoção de 86,4% na DQO. Utilizando a mesma matéria prima, Un et al., (2014) realizou um estudo utilizando um reator de eletrocoagulação contínua com ânodo e cátodo de ferro alcançando uma remoção de 86,4% de DQO com pH 5, densidade de corrente 60 mA/cm^2 e tempo de retenção de 20 minutos.

Melchiors et al. (2016), por sua vez, estudou a eficiência da eletrocoagulação para tratamento de efluente líquido de laticínio bruto, utilizando pH 5,0, condutividade de 5000 mA/cm^2 e tempo de retenção de 60 minutos, onde obteve-se 97% de remoção da DQO e 99% na remoção da turbidez. O eletrodo de Al permitiu uma clarificação mais rápida, enquanto que o eletrodo de Fe levou a uma solução aquosa remanescente mais clara, mas com um subproduto sólido de coloração aparente, contudo não foram encontrados estudos onde tenha sido utilizada a eletrocoagulação após o tratamento anaeróbio. As principais vantagens e desvantagens da utilização da eletrocoagulação está descrito no Quadro 5.

Quadro 5: Vantagens e desvantagens da utilização de eletrocoagulação.

Vantagens	Desvantagens
- Baixa energia;	- Substituição regular de ânodos e cátodos pois são consumidos;
- Adequada para operação descentralizada / rural;	- Incrustações de lodo nos eletrodos, causando ineficiência no processo;
- Baixo risco de contaminação secundária;	- Requer fonte de energia;
- Baixo custo de capital e operacional;	- Efluente tratado apresenta alta concentração de AL e Fe, necessitando pós tratamento em alguns casos antes do descarte.
- Separação da matéria orgânica mais eficaz e rápida que na coagulação;	-
- Não é necessário controle de pH, a não ser por valores extremos;	-
- Coagulantes eletro gerados diretamente, não sendo necessária adição de íons cloreto ou sulfato, eliminando os ânions competitivos e permitindo remoção máxima de adsorção;	-
- Requer menor quantidade de produtos químicos, pois o coagulante eletro gerado é altamente puro, melhorando a remoção de poluentes;	-
- Redução no volume de lodo;	-
- Remoção de uma ampla variedade de contaminantes.	-

Fonte: Adaptado de Segura et al., (2018); Reilly et al., (2019).

Analisando o Quadro 5, verificamos que as vantagens superam as desvantagens da eletrocoagulação, destacando que a eletrocoagulação requer um baixo custo de capital e operacional, reduz o volume de lodo e remove uma ampla variedade de contaminantes.

2.4 Conclusões

O soro de leite mesmo após o processo de beneficiamento, necessita de tratamento para o seu efluente devido a elevada quantidade de matéria orgânica e nutrientes presente em sua composição.

Os processos anaeróbios mostram-se eficientes no tratamento do efluente do soro de leite, pois esses processos possuem boa capacidade de tratar efluentes que apresentam elevada carga orgânica. No entanto, esses processos não eliminam nitrogênio e fósforo, sendo então necessário a aplicação de pós-tratamentos.

A eletrocoagulação mostra-se uma interessante opção de pós-tratamento, pois é eficaz na remoção de poluentes persistentes e nutrientes. Além de baixo custo e não necessitar de ajustes de pH a não ser por valores extremos, fácil aplicação e baixa geração de lodo.

Em geral, esse review apresentou as principais vantagens, aplicações e resultados promissores da eletrocoagulação como pós-tratamento do efluente de soro de leite, contudo necessitam estudos que comprovem a eficiência da combinação desses estudos em efluente do soro de leite.

Referências

- Araújo, K. S., Antonelli, R., Gaydeczka, B., Granato, A. C. & Malpass G. R. P. (2016). Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. *Revista Ambiente & Água*, 11(2), 387-401.
- Brum, L. F.W., Junior, L. C.O. S. & Benedetti, S. (2009). Reaproveitamento de Água de Processo e Resíduos da Indústria de Laticínios. *2º International Workshop - Advances in Cleaner Production*.
- Carvalho, F., Prazeres, A. R. & Rivas, J. Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. (2013). *Science of Total Environment*, 445-446, 385-396.
- Chernicharo, C. A. L. (2008). *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: reatores anaeróbios*, Rio de Janeiro, 5, 121.
- Cuff, G., Turcios, A. E., Mohammad-Pajooh, E., Kujawski, O., Weichgrebe, D. & Rosenwinkel, K. H. (2018). High-rate anaerobic treatment of wastewater from soft drink industry: Methods, performance and experiences. *Journal of Environmental Management*, 220, 8–15.
- Dereli, R. K., Zee, F. P. V., Ozturk, I. & Lier, J. B. V. (2019). Treatment of cheese whey by a cross-flow anaerobic membrane bioreactor: Biological and filtration performance. *Environmental Research*, 168, 109-117.
- Diamantis, V. I., Kapagiannidis, A. G., Ntougias, S., Tataki, V., Melidis, P. & Aivasidis, A. (2014). Two-stage CSTR–UASB digestion enables superior and alkali addition-free cheese whey treatment. *Biochemical Engineering Journal*, 84, 45-52.
- Domingues, L., Guimarães, P. M. R. & Teixeira, J. A. (2010). Fermentation of lactose to bio-ethanol by yeasts as part of integrated solutions for the valorisation of cheese whey. *Biotechnology Advances*, 28, 375-384.
- Embrapa. (2018). *Anuário leite 2018: Indicadores, tendências e oportunidades para quem vive no setor leiteiro*, São Paulo, 1, 114.
- Fang, H. H. P. (1991). Treatment of wastewater from a whey processing plant using activated sludge and anaerobic processes. *Journal of Dairy Science*, 74, (6), 2015-2019.
- Frigon, J. C., Breton, J., Bruneau, T., Moletta, R. & Guiot, S.R. (2009). The treatment of cheese whey wastewater by sequential anaerobic and aerobic steps in a single digester at pilot scale. *Bioresource Technology*, 100, 4156–4163.
- Gajo, F. F. S., Gajo, A. A., Silva, R. B. V. & Ferreira, E. B. (2016). Diagnóstico da destinação do soro de leite na mesorregião do campo das vertentes – Minas Gerais. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes*, 71 (1), 26-37.
- Ganju, S., Gogate, P. R. (2017). A review on approaches for efficient recovery of whey proteins from dairy industry effluents. *Journal of Food Engineering*, 215, 84-96.
- Hamdi, M., Gannoun, H., Khelifi, E., Bouallagui, H. & Touhami, Y. (2008). Ecological clarification of cheese whey prior to anaerobic digestion in upflow anaerobic filter. *Bioresource Technology*, 99, 6105-6111.
- Iltchenco, S., Preci, D., Bonifacin, C., Fraguas, E. F., Steffens, C., Panizzolo, L. A., Colet, R., Fernandes, I. A., Abirached, C., Valduga, E. & Steffens, J. (2018). Whey protein concentration by ultrafiltration and study of functional properties. *Ciência Rural*, 48 (5).
- Kajjumba, G. W., Yildirim, E., Aydin, S., Emik, S., Agun, T., Osra, F. & Wasswa, J. (2019). A facile polymerization of magnetic coal to enhanced phosphate removal from solution. *Journal of Environmental Management*, 247, 356-362.
- Kalyuzhnyi, S. V., Martinez, E. P. & Martinez, J. R. (1997). Anaerobic treatment of high-strength cheese-whey wastewater in laboratory and pilot UASB-reactors. *Bioresource Technology*, 60, 59-65.
- Kim, M. (2011). Estudo da variabilidade de turbidez no trecho superior no rio Guandu. Projeto final de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- Lin, C. S. K., Koutinas, A. A., Stamatelatou, K., Mubofu, E. B., Matharu, A. S., Kopsahelis, N., Pfaltzgraff, L. A., Clark, J. H., Papanikolaou, S., Kwan, T. H. & Luque, R. (2014). Current and future trends in food waste valorization for the production of chemicals: materials and fuels: a global perspective. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*.
- Magalhães, K. T., Dragone, G., Pereira, G. V. M., Oliveira, J. M., Domingues, L., Teixeira, J. A., Silva, J. B. A. S. & Schwan, R. (2011). Comparative study of the biochemical changes and

volatile compound formations during the production of novel whey-based kefir beverages and traditional milk kefir. *Food Chemistry*, 126, 249–253.

Marquardt, L., Rohlfes, A. L. B., Baccar, N. M., Oliveira, M. S. R. & Richards, N. S. P. S. (2011). Indústrias lácteas: alternativas de aproveitamento do soro de leite como forma de gestão ambiental. *TECNO-LÓGICA*, 15(2), 79-83.

Melchioris, M. S., Piovesan, M., Becegato, V. R., Becegato, V. A., Tambourgi, E. B. & Paulino, A. T. (2016). Treatment of wastewater from the dairy industry using electroflocculation and solid whey recovery. *Journal of Environmental Management*, 182, 574-580.

Melo, T. B. (2018). *Ecotoxicidade de efluente sintético contendo alquilbenzeno linear sulfonado (LAS) proveniente do tratamento por eletrocoagulação*. Monografia (Graduação)- Universidade Federal de Goiás, Graduação em Engenharia Civil ou Engenharia Ambiental e Sanitária, Goiás, 2018.

Meneses, Y. E. & Flores, R. A. (2016). Feasibility, safety, and economic implications of whey-recovered water in cleaning-in-place systems: A case study on water conservation for the dairy industry. *Journal of Dairy Science*, 99 (5), 3396-3407.

Nunes, L. A., Gerber, J. Z., Costa, F. P., Souza, R. J. S. & Kalid, R. A. (2018). O soro do leite, seus principais tratamentos e meios de valorização. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 11 (1), 301-326.

O'Flaherty, V., Mchugh, S. & Collins, G. (2006). Long-Term, high-rate anaerobic biological treatment of whey wastewater at psychrophilic temperatures. *Bioresource Technology*, 97, 1669-1678.

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J. & Shitsuka R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*, Santa Maria, 1, 119.

Prazeres, A. R., Carvalho, F. & Rivas, J. (2012). Cheese whey management: A review. *Journal of Environmental Management*, 110, 48-68.

Prazeres, A. R., Carvalho, F. & Rivas, J. (2013). Fenton-like application to pretreated cheese whey wastewater. *Journal of Environmental Management*, 129, 199-205.

Prazeres, A. R., Rivas, J., Almeida, M. A., Patanita, M., Dôres, J. & Carvalho, F. (2016). Agricultural reuse of cheese whey wastewater treated by NaOH

precipitation for tomato production under several saline conditions and sludge management. *Agricultural Water Management*, 167, 62–74.

Rajeshwari, K.V., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, B. K. & Kishore, V.V.N. (2000). State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 135-156.

Reilly, M., Cooley, A. P., Tito, D., Tassou, S. A. & Theodorou, M. K. (2019). Electrocoagulation treatment of dairy processing and slaughterhouse wastewaters. *Energy Procedia*, 161, 343-351.

Rico, C., Muñoz, N., Fernández, J. & Rico, J. L. (2015). High-load anaerobic co-digestion of cheese whey and liquid fraction of dairy manure in a one-stage UASB process: Limits in co-substrates ratio and organic loading rate. *Chemical Engineering Journal*, 262, 794-802.

Rivas, J., Prazeres, A. R., Carvalho, F. & Beltran, F. (2010). Treatment of cheese whey wastewater: combined coagulation – flocculation and aerobic biodegradation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, 7871-7877.

Rivas, J., Prazeres, A. R. & Carvalho, F. (2011). Aerobic biodegradation of pre-coagulated cheese whey wastewater. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 2511–2517.

Segura, S. G., Eiband, M. M. S. G., Melo, J. V. & Huitle, C. A. M. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 801, 267-299.

Spachos, T. & Stamatis, A. (2011). Thermal analysis and optimization of an anaerobic treatment system of whey. *Renewable Energy*, 36, 2097-2105.

Tehrani, R. N. A., Mohammadi, A. & Khadir, A. (2019). Optimization of nitrogen removal from an anaerobic digester effluent by electrocoagulation process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7, 103195.

Tirado, L., Gokkus, O., Brillas, E. & Sires, I. (2018). Treatment of cheese whey wastewater by combined electrochemical processes. *Journal of Applied Electrochemistry*, 48, 1307-1319.

Un, U. T., Kandemir, A., Erginel, N. & Ocal, S. E. (2014). Continuous electrocoagulation of cheese whey wastewater: An application of Response

Surface Methodology. *Journal of Environmental Management*, 146, 245-250.

Vettorello, G., Dalcorso, A. B., Betti, J., Kemerich, G. T. & Oliveira, E. C. (2017). Elaboração de sorvete com adição de soro de queijo em pó. *Revista Destaques Acadêmicos*, 9 (4), 142-150.

3 PÓS TRATAMENTO POR ELETROCOAGULAÇÃO UTILIZANDO ELETRODO DE FERRO E ALUMÍNIO EM EFLUENTE DO PROCESSAMENTO DO SORO DE LEITE TRATADO POR REATOR ANAERÓBIO

Resumo

O soro de leite é um subproduto da produção de queijo, que apresenta como características principais elevado teor de matéria orgânica, presente como lactose, proteínas e minerais. O processamento do soro de leite gera um efluente com elevada carga orgânica e de nutrientes que não pode ser descartado sem tratamento pois implicaria em problemas ambientais, como eutrofização de corpos d'água. O tratamento mais indicado para esse tipo de efluente é o tratamento anaeróbio, pois da degradação da matéria orgânica é gerado o biogás, que pode ser utilizado pela indústria como fonte de energia, porém esse tratamento necessita de controle rigoroso de temperatura e não apresenta remoção satisfatória de nitrogênio e fósforo, necessitando de tratamento posterior para a remoção dos mesmos. O tratamento eletrolítico apresenta-se como uma opção de pós-tratamento ao tratamento anaeróbio devida a utilização de equipamento de fácil operação, mas que necessita de fonte de energia para a realização do mesmo. Não foram encontrados estudos relacionando a utilização do tratamento eletrolítico após o tratamento anaeróbio, portanto o presente trabalho foi desenvolvido objetivando utilizar o tratamento anaeróbio como tratamento primário para o efluente do soro de leite, visando a remoção de DQO. O mesmo, apresentou remoção de 96,08%, 98,26% e 98,45% em 15°C, 25°C e 35°C respectivamente, pelo período de tratamento de 10 dias. No segundo tratamento realizado com reator anaeróbio, pelo período de 3 dias, obteve-se remoção de 75,56%, 91,84% e 97,15% nas mesmas temperaturas. O tratamento anaeróbio apresentou boa remoção de DQO, mas não de nutrientes, sendo então utilizado em cada efluente trabalhado em reator anaeróbio, o tratamento posterior de eletrocoagulação para remoção de DQO e fósforo. O eletrodo que demonstrou melhor remoção de DQO foi o eletrodo de ferro alcançando 91% de eficiência, e na remoção de fósforo o eletrodo de alumínio apresentou melhor resultado, com 64% de remoção, demonstrando que o tratamento eletrolítico como pós tratamento ao tratamento anaeróbio é eficiente na remoção dos mesmos.

3.1 INTRODUÇÃO

O soro de leite é um subproduto da fabricação do queijo sendo considerado o resíduo líquido de maior contaminação gerado pela indústria de laticínio. Ele se apresenta com coloração amarelo-esverdeada e representa de 85-95% do volume do leite, contendo cerca de 55% de seus nutrientes. Dentre esses nutrientes incluem-se proteínas, minerais, vitaminas e lactose, considerados valiosos para a indústria de alimentos (CHARALAMBOUS et al., 2020; MERKEL et al., 2021).

A indústria de fabricação de queijo é responsável pela geração de três efluentes distintos. O primeiro soro de leite é resultante da produção de queijo, o segundo resulta da produção de queijo cottage e o terceiro é o soro de leite com águas residuais (CARVALHO et al., 2013; PRAZERES et al., 2012).

A produção global de soro de leite é estimada em 145 milhões de toneladas por ano, das quais aproximadamente metade é descartada inadequadamente sem tratamento, transformando-se em um rejeito nocivo a natureza e causando impactos ambientais (GANJU e GOGATE., 2020; MARQUARDT et al., 2011).

As águas residuais provenientes da valorização são constituídas por diferentes diluições de soro de leite com água de lavagem, que geralmente contém produtos químicos ácidos e alcalinos utilizados neste processo. As características destes efluentes dependem de fatores como: produtos finais, tipo de sistema, método de operação, gestão de águas residuais e clima, tornando-se uma preocupação para o meio ambiente devida a elevada demanda química e biológica de oxigênio, além de elevados valores de óleos e gorduras, nitrogênio e fósforo (PRAZERES et al., 2013; PRAZERES et al., 2014; PRAZERES et al., 2016).

O tratamento biológico mais utilizado para águas residuais de soro de leite é digestão anaeróbia que se destaca por ser uma opção ecologicamente correta devida à redução biológica de compostos orgânicos em biogás, porém esse tratamento demonstra algumas desvantagens, como: remoção de nitrogênio e fósforo insatisfatórias além de gerar efluente com aspecto desagradável e usualmente com qualidade insuficiente para atender os padrões ambientais, necessitando de um tratamento complementar (CHARALAMBOUS et al., 2020; CHERNICHARO, 2008).

A eletrocoagulação demonstra ser uma boa opção de pós-tratamento ao tratamento anaeróbio, pois não necessita de controle de pH (apenas para valores extremos), apresenta baixo risco de contaminação secundária e o equipamento é de fácil operação, contudo algumas desvantagens devem ser levadas em consideração, como: substituição regular de ânodos e

cátodos pois são consumidos pelo processo; incrustação de lodo nos eletrodos, causando ineficiência do processo; requer fonte de energia e o efluente tratado apresenta alta concentração de alumínio e ferro, necessitando pós tratamento em alguns casos antes do descarte (TAHREEN et al., 2020; UN et al., 2014; SEGURA et al., 2018; REILLY et al., 2019).

Segura et al., (2017) e Un et al., (2014) realizaram estudos eletrolíticos com efluente de soro de leite, ambos utilizaram eletrodo de ferro e densidade de corrente de 60 mA/cm^2 , obtendo remoção de 86% na DQO. Não foram encontrados estudos que relacionassem a utilização de tratamento eletrolítico após tratamento anaeróbico em efluente oriundo do processamento do soro de leite.

Levando em consideração estes fatores, o objetivo desse estudo foi primeiro avaliar a eficiência do reator anaeróbico no tratamento do efluente oriundo do processamento do soro de leite e, após aplicar eletrocoagulação com eletrodos de alumínio e ferro para remoção de DQO e fósforo, a fim de verificar os impactos do seu lançamento em corpos d'água e reuso na indústria.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.0 Efluente do processamento de soro de leite

O efluente do soro de leite foi doado por uma empresa de produção de soro de leite em pó na região Norte do Rio Grande do Sul, sendo realizada duas coletas do mesmo, uma no mês de março e outra no mês de dezembro de 2020. O efluente foi armazenado em bombonas de 20 litros e alocado em câmara fria com temperatura média de 8°C pelo período de 6 meses.

3.2.1 Caracterização do efluente

As amostras foram caracterizadas seguindo a metodologia mencionada em Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater (APHA), para as análises de alcalinidade total, condutividade, cor aparente, fósforo, nitrogênio total, óleos e graxas, pH, sólidos totais, sólidos suspensos totais, sulfato, turbidez e DQO. Para a análise de ácidos graxos voláteis (AGV) foi utilizada a metodologia de Kapp (1984) descrito por Bauchauer (1998). As análises de alumínio e ferro foram realizadas em espectrômetro de absorção atômica.

Os resultados da caracterização do efluente bruto da indústria de processamento de soro de leite estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Características físico-químicas do efluente bruto do beneficiamento de soro de leite.

Parâmetros	Amostra 1	Amostra 2
Alcalinidade Total (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	697,75 ± 15,05	2867,3 ± 5,3
Alumínio Total (mg Al L ⁻¹)	0,77 ± 0,03	0,76 ± 0,08
Condutividade (µS cm ⁻¹)	1712,0 ± 9,0	2666,0 ± 15,0
Cor Aparente (uH)	13825,0 ± 75,0	15416,0 ± 66,0
Ferro Total (mg Fe L ⁻¹)	1,17 ± 0,02	0,78 ± 0,03
Fósforo (mg F L ⁻¹)	209,12 ± 0,6	172,99 ± 1,78
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg NTK L ⁻¹)	7,55 ± 0,35	5,9 ± 2,0
Óleos e graxas (mg L ⁻¹)	90,0 ± 14,0	36,0 ± 3,0
pH	4,0 ± 0,05	4,25 ± 0,01
Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻ L ⁻¹)	470,25 ± 3,25	358,0 ± 5,0
Turbidez (NTU)	106,75 ± 8,25	115,0 ± 2,0
DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	7650,0 ± 20,0	6773,0 ± 67,0

Fonte: Autor (2021).

3.2.2 Reator anaeróbio

O reator anaeróbio em escala de bancada teve formato cilíndrico, constituído por aço inoxidável, com 50 cm de altura; 31,7 cm de diâmetro e capacidade total de 38,6L. O controle de temperatura foi realizado através de serpentina de mesmo material do reator acoplada em banho termostatizado. O tratamento se deu em dois momentos, um com 3 e outro com 10 dias de retenção do efluente no reator.

3.2.3 Adaptação da biomassa, condições e procedimentos experimentais

O reator foi lavado e utilizada a mesma biomassa (11 litros) de Zanin (2019). A biomassa levou em torno de 6 semanas para se adaptar a cada temperatura trabalhada.

Foram utilizados 10L de fluente para cada tratamento, com pH ajustado em torno de 7. A alimentação se deu por batelada, sendo o efluente adicionado no reator no primeiro dia de tratamento e retirado somente no final de cada experimento.

A recirculação da biomassa foi realizada com a ajuda de uma bomba peristáltica por 1,5h por dia. A temperatura foi mantida em 15°C ± 2; 25°C ± 2 e 35°C ± 7 em cada tratamento

por meio de banho termostático conectado ao reator. A biomassa foi coletada por uma válvula de entrada/saída de efluente no reator após adaptação e armazenadas em freezer para posterior análise. Os parâmetros utilizados para controlar e monitorar a estabilidade do reator e eficiência do tratamento foram: DQO, AGV, Alcalinidade e pH.

3.2.4 Caracterização do biogás gerado pelo reator anaeróbio

A produção de biogás durante o tratamento anaeróbio será avaliada qualitativamente e quantitativamente, onde um bag, SKC Sample Pro FlexFilm Bags, foi acoplado a saída de gás e posteriormente será analisado em cromatógrafo para análise de metano, dióxido de carbono e outros, nas temperaturas de 15, 25 e 35°C. A válvula foi aberta durante o processo de recirculação por um período de 10 dias e o bag foi armazenado para posterior análise.

3.2.5 Tratamento por eletrocoagulação

O tratamento eletrolítico foi realizado com eletrodo de alumínio e ferro após tratamento anaeróbio. Cada tratamento por eletrocoagulação utilizou um ânodo e um cátodo, com distância de 1cm entre os mesmos, ligado a uma fonte de corrente contínua.

Foi utilizado 500mL do efluente tratado por reator anaeróbio para a realização dos experimentos eletrolíticos e para as análises de DQO e fósforo foi retirada uma alíquota de 20mL do mesmo com a ajuda de uma espátula e pipeta volumétrica.

Para o planejamento experimental foram utilizadas como variáveis independentes o tempo de retenção (20-40 minutos) e a densidade de corrente (0,5-1,0 A/m²) e como variáveis dependentes: DQO e fósforo para cada tipo de eletrodo utilizado, sendo adotado o planejamento experimental 2².

3.2.6 Tratamento de dados e análise estatística

Os dados resultantes dos experimentos de eletrocoagulação foram avaliados quanto a significância e efeitos estimados das variáveis principais e de interação (<0,05). As diferenças entre as médias dos testes foram avaliadas pela análise de variância (ANOVA), seguida do teste de Tukey, com nível de confiança de 95%.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Caracterização do efluente bruto

Os resultados obtidos na caracterização do efluente bruto demonstram que este material possui elevados valores de DQO (7650 – 67773 mg/L), que pode ser associado ao teor de lactose, baixa concentração de nitrogênio (7,55 – 5,9 mg/L) e baixo pH (4 – 4,25). Segundo Dereli et al., (2019), a baixa concentração de nitrogênio se deve a utilização da caseína no processo de fabricação do queijo.

O valor do fósforo encontrado na caracterização da amostra (209,12 – 172,99 mg/L), pode estar ligado aos polifosfatos devida a utilização de detergentes para a limpeza dos equipamentos. De acordo com Jenzura et al., (2017), o fósforo presente também pode estar na forma iônica como fosfatos, fósforo orgânico e ortofosfato.

O aumento da alcalinidade (697,75 – 2867,3 mg/L) e da condutividade (1712 – 2666 $\mu\text{S cm}^{-1}$), nos leva a percepção de mudanças nos processos de fabricação ou alteração nos materiais de limpeza, ou ainda descartes de fundo de caldeira.

Zanin (2019) trabalhou com efluente de soro de leite, obtendo valores de DQO próximos aos encontrados neste trabalho, no entanto os valores de alcalinidade, fósforo e nitrogênio não vem de encontro com os obtidos por este. O fato do efluente trabalhado pela mesma não ser da mesma empresa que o efluente trazido neste trabalho nos leva a percepção de diferentes tipos de processos empregados.

3.3.2 Comportamento das variáveis de controle operacional

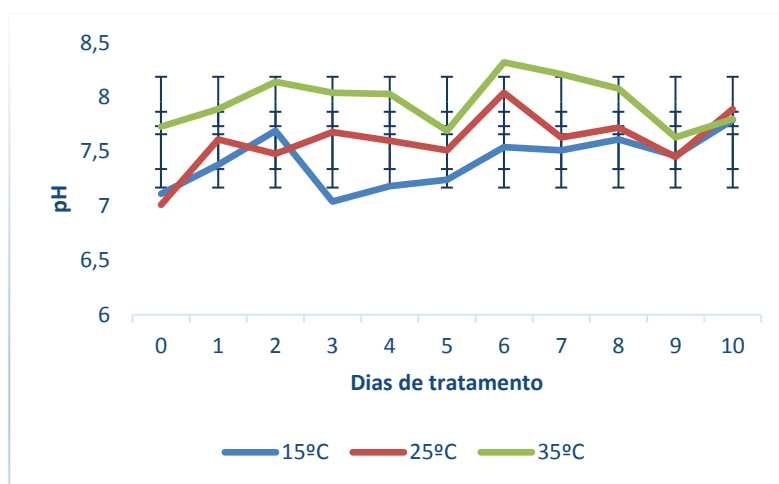
A Tabela 2 apresenta a compilação dos resultados para os experimentos com 3 dias e 10 dias de tratamento anaeróbio. A Figuras 1 mostra o comportamento das variáveis de controle (pH, alcalinidade e AGV) e DQO ao longo do tratamento anaeróbio de 10 dias.

Tabela 2: Valores iniciais e finais das variáveis de controle operacional (pH, alcalinidade e AGV) e DQO do efluente tratado em reator anaeróbio em função da temperatura e do tempo.

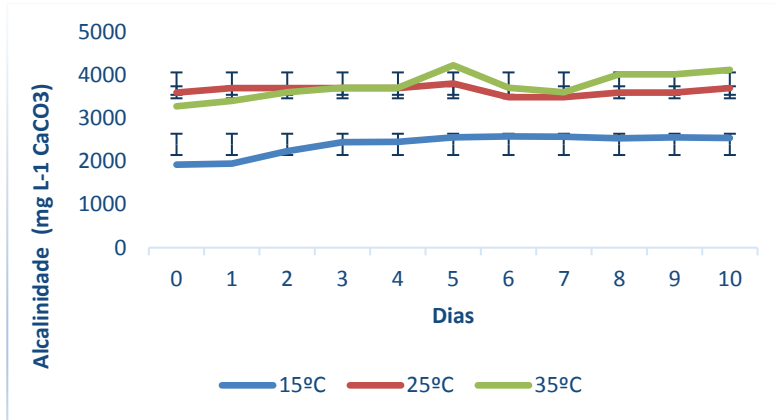
Variáveis de controle operacional	Temperatura (°C)					
	15		25		35	
	Duração do tratamento anaeróbio (d)					
	3	10	3	10	3	10
pH _{bruto}	4,0	4,0	4,0	4,0	4,25	4,25
pH _{inicial}	7,07	7,74	6,99	6,95	7,36	7,23
pH _{final}	7,09	7,59	8,08	7,63	8,17	7,65
Alcalinidade inicial	697,75	697,75	697,75	697,75	2867,3	2867,3
Alcalinidade final	2811,2	2558,15	3836,0	3722,0	5114,0	4117,0
AGV inicial	61,64	55,53	33,66	48,16	16,13	37,32
AGV final	32,28	8,82	4,69	4,78	5,36	5,39
DQO inicial	7650,0	7650,0	7650,0	7650,0	6773,0	6773,0
DQO final	1870,0	300,0	624,0	133,0	193,0	105,0

Fonte: Autor (2021).

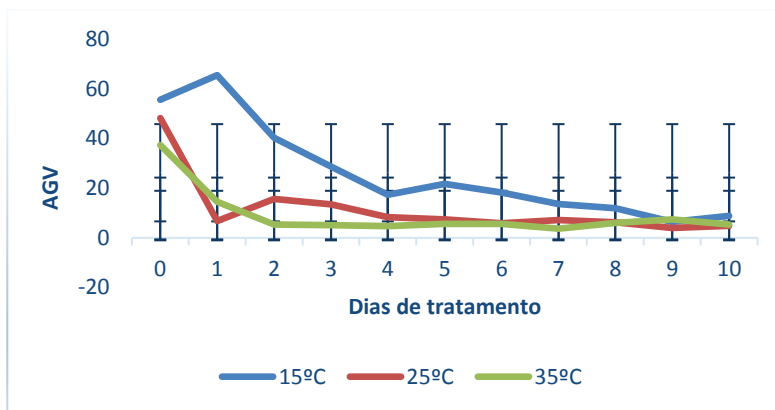
Figura 1: Comportamento das variáveis operacionais operacional (pH, alcalinidade e AGV) e DQO do efluente tratado em reator anaeróbio em função da temperatura ao longo dos 10 dias de tratamento.



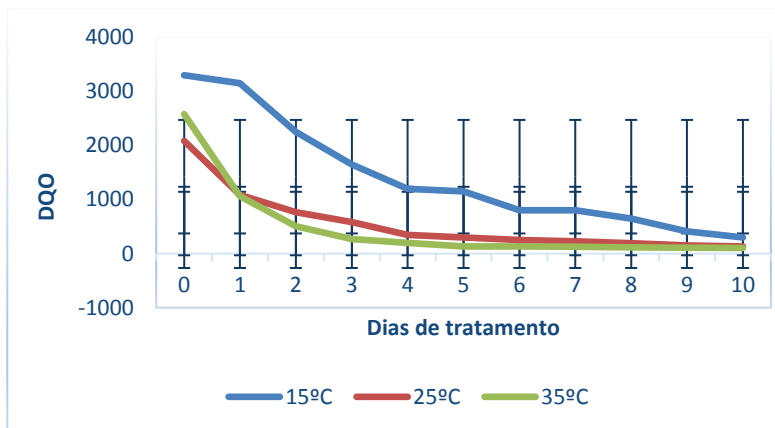
(a) pH



(b) Alcalinidade



(c) AGV



(d) DQO

O pH do efluente bruto utilizado para o tratamento ficou em torno de 7 e se manteve estável no decorrer do tratamento (Figura 1a). Esta estabilidade pode ser explicada pelo comportamento da variação da alcalinidade (Figura 1b) e AGV (Figura 1c), que foram inversamente proporcionais. Os AGVs diminuíram ao longo do tempo, enquanto a alcalinidade aumentou. Estes comportamentos demonstram que os processos de acidogênese/acetogênese e

consequente produção de AGV foram neutralizados pela alcalinidade presente, sem que o pH fosse alterado significativamente.

De acordo com Chernicharo (2014), o sistema carbônico (CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-}) exerce grande importância na estabilidade do pH, sendo que para valores entre 6,5 a 7,5, a alcalinidade se deve aos bicarbonatos (HCO_3^-) e as principais fontes de alcalinidade são as proteínas que liberam amônia e o acetato que gera bicarbonato.

O pH ideal na acidogênese é 5,8 a 6,0 e na metanogênese é 6,8 a 7,2, o que indica que o efluente trabalhado está na faixa metanogênica. A Alcalinidade sofreu alteração nos diferentes tratamentos, obtendo valores de 697,75 a 2867,3 mgL^{-1} no efluente bruto e após tratamento anaeróbio a alcalinidade variou de 2558,15 a 5114,0 mgL^{-1} . O maior valor obtido no AGV foi de 61,64 no tratamento de 3 dias a 15°C. Segundo, Chernicharo (2008), o valor de alcalinidade ideal é de 1000 a 5000 $\text{CaCO}_3 \text{ mgL}^{-1}$ e o AGV até 250 mgL^{-1} para um bom desempenho do reator (CHERNICHARO, 2008).

De acordo com Van Haandel e Lettinga (1994), pH acima de 7,8 e inferior a 6,3 reduz a faixa metanogênica, o que pode causar instabilidade no reator se os ácidos que foram produzidos na acidogênese não forem processados na metanogênese. Embora o pH tenha ficado fora destas faixas ideais em alguns momentos, este fato não parece ter afetado o reator anaeróbio tratando efluente de beneficiamento de soro de leite, uma vez que a DQO diminuiu sistematicamente com o tempo de tratamento (Figura 1d). Isto indica que as arqueas metanogênicas conseguiram se desenvolver e remover os acetatos produzidos na degradação da matéria orgânica presente no efluente do beneficiamento do soro de leite.

A temperatura também provocou diferenças entre as variáveis de controle e também na DQO. O pH, em média, foi maior quanto maior a temperatura, sendo acompanhado pela alcalinidade. O comportamento inverso foi observado pelo AGV. As temperaturas mais baixas afetam as eficiências dos reatores anaeróbios, mas em especial a fase metanogênica, que não consegue consumir os acetatos e conseqüentemente há um acúmulo de AGV no reator e diminuição de eficiência de remoção de carga orgânica (MAO et al., 2015)

Na temperatura de 15°C uma elevação dos AGVs no primeiro dia de tratamento pode estar relacionada com uma sobrecarga no reator. De acordo com Peruzzo (2017), O aumento da concentração de ácidos graxos pode indicar uma sobrecarga orgânica no reator, pois as metanogênicas não são capazes de metabolizar o acetato até que o número de organismos metanogênicos tenha aumentado suficientemente.

Nas temperaturas de 25°C e 35°C a diminuição dos AGVs ao longo do tempo se comportou de forma similar, sendo acompanhada pelas curvas de diminuição da DQO. O

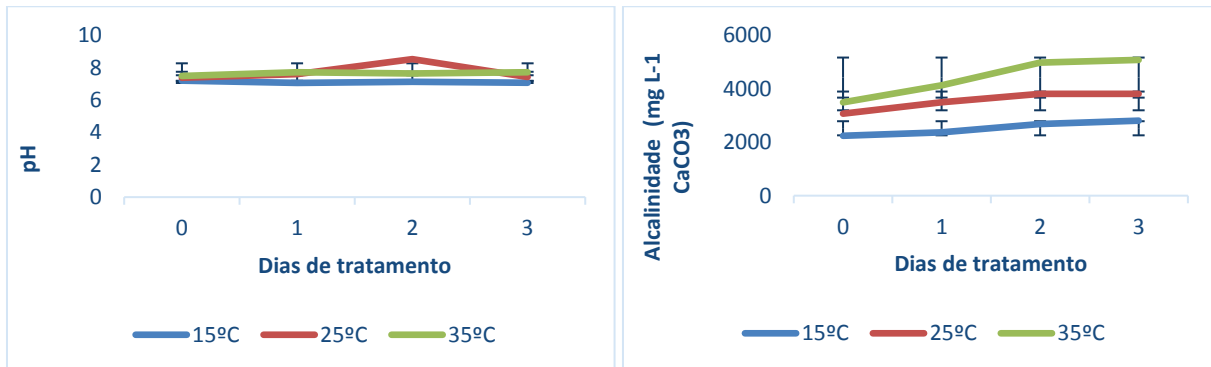
mesmo pode ser para a alcalinidade, no entanto de modo inverso a DQO e o AGV. Este comportamento evidencia a necessidade de alcalinidade, bem como a relação direta entre as fases acidogênica/acetogênica e a metanogênica no reator anaeróbio tratando efluente do beneficiamento de soro de leite (CHERNICHARO, 2008).

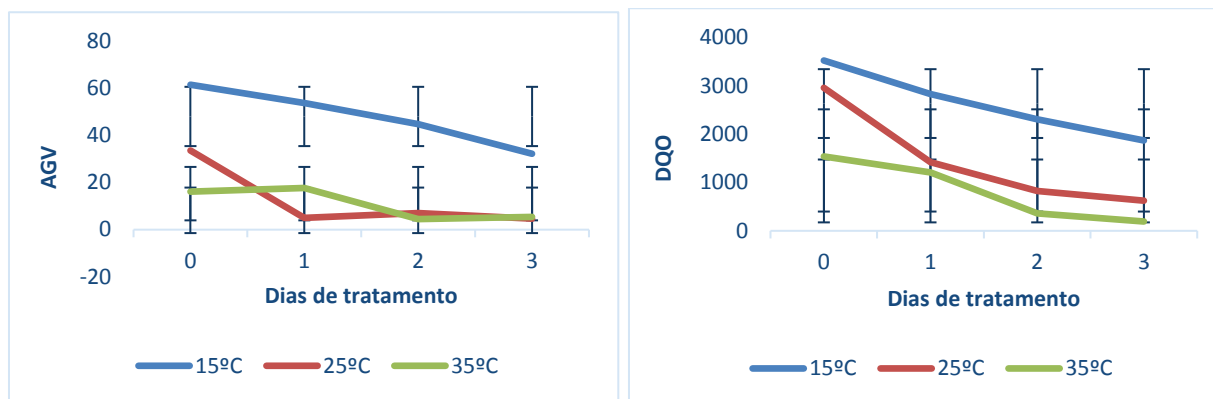
A alcalinidade é um parâmetro a se levar em consideração, pois ela está diretamente ligada a variação de pH. De acordo com Jenzura et al., (2017), se a quantidade de alcalinidade não é suficiente o pH sofre diminuição.

A variação de DQO ao longo do tempo de tratamento, apresentada na Figura 1d, apresentou diminuição até o final do tratamento anaeróbio. Em 15°C, a eficiência do reator na remoção de DQO foi de 90,91%, em 25°C de 93,62% e em 35°C 95,93%. De acordo com Costa et al., (2014), quanto menor a temperatura, mais baixa é a eficiência do reator anaeróbio e consequentemente menor é a remoção de matéria orgânica.

Na temperatura de 25°C, o pico do AGV ocorreu entre os dias 0-1 e onde obteve-se maior remoção de DQO 47,94%. Em 35°C a maior taxa foi entre os dias 0-1 também, com remoção de 58,91% de DQO. Estas altas taxas se estenderam até o 3º dia de tratamento, em especial para as temperaturas de 25°C e 35°C. Isto indicou que não seria necessário utilizar os 10 dias de tratamento, como indicado por Zanin (2020), para então aplicar a eletrocoagulação, diminuindo o volume do reator anaeróbio em uma aplicação real. Desta forma, realizou-se novos experimentos nas mesmas condições, só diminuindo o tempo de tratamento para 3 dias. A Figura 2 apresenta os resultados do tratamento anaeróbio de efluente do beneficiamento de soro de leite com 3 dias de tratamento.

Figura 2: Comportamento das variáveis operacionais operacional (pH, alcalinidade e AGV) e DQO do tratamento anaeróbio em função da temperatura ao longo dos 3 dias de tratamento no reator anaeróbio.





Fonte: Autor (2021).

A Figura 2 mostrou que o comportamento das variáveis operacionais de controle (pH, alcalinidade e AGV) e da DQO em 3 dias de tratamento foram semelhantes aos 10 dias de tratamento, indicando a reprodutibilidade dos experimentos e adaptação adequada da biomassa.

Os dados do tratamento anaeróbico, tanto em 3 dias quanto em 10 dias, mostraram a importância do controle das variáveis operacionais (pH, alcalinidade e AGV) na remoção de DQO de efluente do beneficiamento do soro de leite e que estas seguem as mesmas prerrogativas já estabelecidas na literatura para diferentes efluentes tratados pelo processo anaeróbico.

A remoção de DQO em 3 dias de tratamento foi de 46,95% para 15°C, 78,92% para 25°C e 87,46% de eficiência para 35°C, mostrando que a diminuição do tempo de tratamento anaeróbico pode ser útil para a diminuição do tempo de detenção hidráulica (TDH) no tratamento em escala real.

Em ambos os tratamentos, o melhor valor de remoção de DQO foi obtida em 35°C, vindo de encontro com o que foi descrito por Chernicharo (2008).

Na Tabela 3 é apresentada a caracterização do efluente após o tratamento anaeróbico.

Tabela 3: Características do efluente após tratamento anaeróbio em função do tempo e temperatura de tratamento.

Parâmetros	Após 3 dias tratamento a 15°C	Após 10 dias tratamento a 15°C	Após 3 dias tratamento a 25°C	Após 10 dias tratamento a 25°C	Após 3 dias tratamento a 35°C	Após 10 dias tratamento a 35°C
Alumínio Total (mg Al L ⁻¹)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Condutividade (µS cm ⁻¹)	3925,0 ± 5,0	4075 ± 5,0	4003,0 ± 7,0	3820 ± 10,0	3950 ± 5,0	3883,0 ± 7,0
Cor Aparente (uH)	3375,0 ± 50,0	787,5 ± 12,5	46,75 ± 2,75	18,0 ± 1,0	24,67 ± 0,33	19,67 ± 1,67
Ferro Total (mg Fe L ⁻¹)	0,27 ± 0,01	0,25 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,06 ± 0,03	0,05 ± 0,01	<0,05
Fósforo (mg F L ⁻¹)	199,19 ± 2,96	190,16 ± 8,0	145,14 ± 0,93	132,10 ± 0,58	114,93 ± 0,3	104,86 ± 0,29
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg NTK L ⁻¹)	<1,0	-	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0
Óleos e graxas (mg L ⁻¹)	-	<5,0	-	<5,0	<5,0	<5,0
Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻ L ⁻¹)	72,0 ± 0,5	54,75 ± 0,25	45,0 ± 0,25	50,35 ± 0,95	24,55 ± 1,45	37,95 ± 2,85
Turbidez (NTU)	20,5 ± 4,0	12,37 ± 4,12	9,84 ± 0,33	3,17 ± 0,22	5,14 ± 0,11	3,17 ± 0,11

Fonte: Autor (2021).

Analisando a Tabela 3 observamos que o tratamento anaeróbio demonstrou boa eficiência em ambos tratamentos realizados.

A concentração de cor e turbidez podem estar relacionadas com a remoção de DQO e quanto maior a temperatura maiores as remoções, sendo atingido em 35°C e 3 dias de tratamento remoção acima de 99% na cor aparente, 96% na turbidez e 97% na DQO. Já para 35°C em 10 dias de tratamento obteve-se uma remoção superior a 99% na cor aparente, 97% na turbidez e 98% na DQO.

O que observamos é que o tratamento anaeróbio tem uma boa remoção dos parâmetros analisados e pode ser utilizado em baixas temperaturas, mas que necessita de mais dias para atingir a mesma eficiência que os demais.

A condutividade sofreu aumento durante os tratamentos, demonstrando que o aumento dos íons se deve a degradação de compostos orgânicos. O lodo é naturalmente condutor pois contém os íons de sódio, potássio, cálcio e amônio. Conforme a digestão anaeróbia acontece, as proteínas são degradadas, ácidos fracos e amônia são formados e acumulados na solução. Os ácidos sofrem dissociação parcial em íons o que contribui para um aumento da condutividade. Esse fator é importante para o posterior tratamento de eletrocoagulação, onde o mesmo é

altamente dependente da química do meio aquoso, principalmente da condutividade (WALTHAM e ORMECI, 2020; WIMMER, 2007).

Na remoção de nutrientes, como o fósforo, o tratamento anaeróbio não demonstrou eficiência na remoção, vindo de encontro com a literatura. Chernicharo (2008), cita em seu estudo que uma das desvantagens do tratamento anaeróbio é remoção insatisfatória de fósforo, e no estudo apresentado realmente não houve boa remoção desse nutriente, sendo então aplicada a eletrocoagulação nos mesmos.

3.4 Eletrocoagulação de efluente após tratamento anaeróbio

A aplicação da eletrocoagulação se deu após os tratamentos anaeróbios. Os eletrodos utilizados foram de alumínio e ferro, variando a densidade de corrente e o tempo de retenção a fim de remover DQO e fósforo.

3.4.1 Remoção de DQO

A Tabela 4 apresenta os dados de remoção de DQO por eletrocoagulação para os diferentes efluentes tratados pelo reator anaeróbio, enquanto que a Tabela 6 apresenta a análise do planejamento fatorial 2^3 .

A análise das remoções de DQO mostram comportamentos diferentes em função do tipo de efluente tratado pelo reator anaeróbio e condição do tratamento eletrolítico. Em relação ao efluente tratado pelo reator anaeróbio, percebeu-se que o valor da DQO inicial da eletrocoagulação influenciou a remoção da DQO por eletrocoagulação. Nos valores extremos a remoção foi menor.

Tabela 4: Remoção de DQO por eletrocoagulação a partir de efluente tratado nas diferentes condições do reator anaeróbio.

Tipo de eletrodo	Tempo de retenção	Densidade de corrente	Remoção de DQO (%) após eletrocoagulação						DQO (mg/L) após eletrocoagulação					
			15°C 3 d	15°C 10 d	25°C 3 d	25°C 10 d	35°C 3 d	35°C 10 d	15°C 3 d	15°C 10 d	25°C 3 d	25°C 10 d	35°C 3 d	35°C 10 d
DQO inicial (mg/L)														
Fe	20	0,5	24	84	79	20	46	8	1870	300	624	133	193	105
Al	20	0,5	21	77	77	5	47	18	1421	47	131,5	106,5	104	96,5
Fe	40	0,5	27	88	85	26	50	10	1485	70	141,5	126,5	101,5	86
Al	40	0,5	23	81	81	39	59	40	1361	36	96,5	99	96,75	94
Fe	20	1,0	22	88	83	19	49	13	1438	57	119	81,5	79,5	63
Al	20	1,0	21	83	86	27	58	16	1466	35	109	96,5	99	91,5
Fe	40	1,0	26	91	86	29	58	25	1472	50	86,5	96,5	81,5	88,5
Al	40	1,0	25	87	89	38	59	31	1379	28	86	94	81,5	78,75
									1397	38	69	82	79	72

Fonte: Autor (2021).

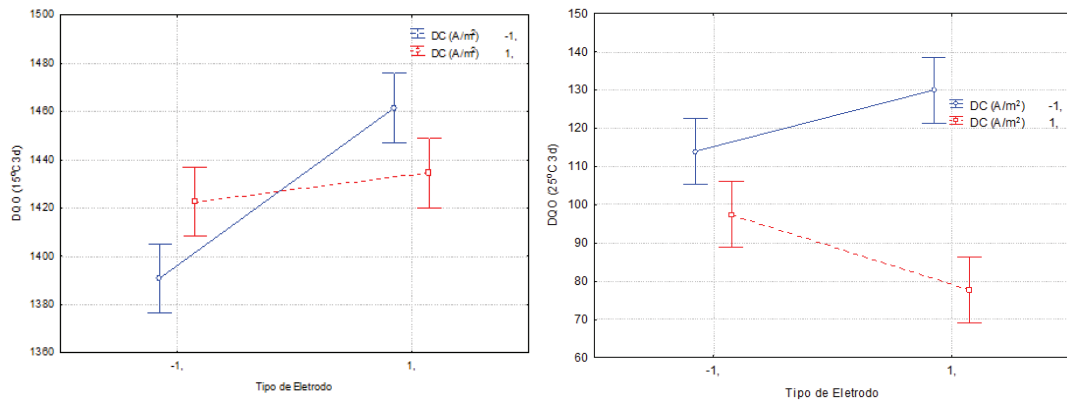
Para o efluente tratado pelo reator anaeróbio na temperatura de 15°C e 3d, a DQO inicial do tratamento eletrolítico foi maior. Isto pode estar associado a maior presença AGVs e acetatos, que são compostos solúveis e de difícil separação pela eletrocoagulação, diminuindo a remoção por este processo de tratamento. O comportamento da eletrocoagulação foi observado para os experimentos a partir de efluente de 25°C e 35°C e 10d, que apresentaram as menores DQO iniciais. Este comportamento similar pode estar associado a um efeito do tratamento anaeróbio contrário ao observado na temperatura de 15°C e 3d, uma vez que a DQO residual no anaeróbio seria pela presença de material orgânico de baixos pesos moleculares e também muito solúveis.

A aplicação da eletrocoagulação permitiu diminuir a DQO até limites inferiores aos estabelecidos pela legislação para lançamento de efluente em corpos receptores (CONSEMA, 2017), mesmo quando o tempo de tratamento no reator anaeróbio foi de 3d, exceto para a temperatura de 15°C. Este comportamento mostra que a combinação dos tratamentos anaeróbio e eletrocoagulação é viável tecnicamente, podendo este último servir de regulador da DQO final quando a temperatura sofrer oscilações em função das condições climáticas do local da aplicação industrial.

O aumento da densidade de corrente e do tempo aumentaram a remoção de DQO. Para o material de eletrodo, quando significativo ($p < 0,05$), o alumínio foi mais eficiente na remoção de DQO, exceto para a temperatura de 15°C. Este tipo de comportamento para a temperatura de 15°C, pode reforçar a hipótese de que a composição da matéria orgânica no efluente final do tratamento anaeróbio muda em função das condições de temperatura e tempo deste tratamento.

Os tratamentos que apresentaram interação significativa foram os tratamentos utilizados com efluente tratado em 15°C no período de 10 dias e com efluente tratado em 35°C no período de 3 dias. Os tratamentos que tiveram efeito vinculado entre os fatores estão demonstrados na Figura 9. Vale ressaltar que a mesma interação para a temperatura de 35°C poderia ser considerada significativa caso fosse considerado $p < 0,15$.

Figura 9: Interação entre médias para o tratamento eletrolítico realizado em efluente de 15 e 25°C após tratamento anaeróbico de 3 dias.



Fonte: Autor (2021).

3.4.2 Remoção de fósforo

No tratamento com efluente de 15°C as melhores médias de remoção são com o eletrodo de alumínio, no tempo de retenção de 40 minutos e densidade de corrente de 1,0 A/m², atingindo eficiência de 63 e 64% na remoção de fósforo em 3 e 10 dias respectivamente.

No tratamento com efluente de 25°C o eletrodo de alumínio obteve melhor remoção de fósforo, atingindo 49 e 43% nos tratamentos de 3 e 10 dias respectivamente, no tempo de 40 minutos e densidade de corrente de 0,5 A/m².

Em efluente de 35°C só é possível comparar a eficiência obtida em efluente de 3 dias de tratamento, onde o alumínio demonstrou melhor eficiência em tempo de retenção de 40 minutos e densidade de corrente de 1,0 A/m².

Analisando a média obtida em ambos tratamentos analisados para remoção de fósforo o melhor eletrodo foi o de alumínio, obtendo média de remoção de 44%, no tempo de retenção de 40 minutos, tanto para densidade de corrente de 0,5 A/m², quanto para a densidade de corrente de 1,0 A/m².

A Tabela 5 apresenta os dados de remoção de fósforo por eletrocoagulação para os diferentes efluentes tratados pelo reator anaeróbico, enquanto que a Tabela 8 apresenta a análise do planejamento fatorial 2³.

Tabela 5: resultados obtidos na remoção de fósforo.

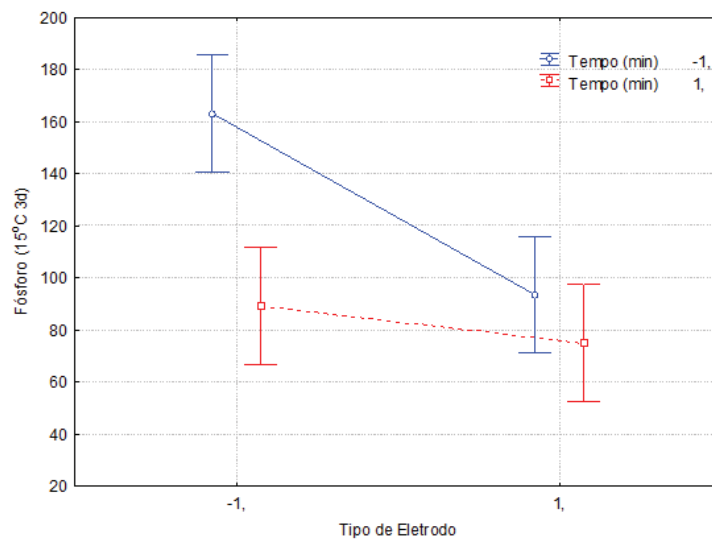
Tipo de eletrodo	Tempo de retenção	Densidade de corrente	Remoção de fósforo (%) após eletrocoagulação						Fósforo (mg/L) após eletrocoagulação					
			15°C 3 d	15°C 10 d	25°C 3 d	25°C 10 d	35°C 3 d	35°C 10 d	15°C 3 d	15°C 10 d	25°C 3 d	25°C 10 d	35°C 3 d	35°C 10 d
Fósforo inicial (mg/L)														
Fe	20	0,5	13	57	8	12	13	-	173,88	81,75	133,29	116,71	99,53	116,71
Al	20	0,5	48	54	33	27	29	9	104,56	86,55	96,56	96,56	81,16	95,38
Fe	40	0,5	61	60	15	23	18	-	77,31	75,24	123,82	101,9	94,79	116,11
Al	40	0,5	62	60	49	42	32	18	76,42	76,42	74,64	77,01	77,61	86,49
Fe	20	1,0	24	60	13	13	3	-	152,25	76,42	125,59	114,93	111,97	117,3
Al	20	1,0	59	57	33	9	23	8	82,34	81,75	97,75	119,67	88,27	95,97
Fe	40	1,0	49	60	16	29	13	-	100,71	75,24	122,63	93,6	100,12	104,86
Al	40	1,0	63	64	43	34	40	17	73,46	68,13	83,53	87,08	69,31	87,08

Fonte: Autor (2021).

A densidade de corrente não influenciou significativamente ($p < 0,05$) na remoção de fósforo. Desta forma, pode-se indicar a menor densidade de corrente para a remoção de fósforo de efluente de beneficiamento de soro de leite tratado por processo anaeróbico. Já o tempo de eletrólise foi significativo ($p < 0,10$) para a maioria das condições experimentais e efluentes tratados pelo reator anaeróbico. Isto pode indicar que maiores densidades de corrente seriam necessárias para aumentar a remoção de fósforo.

O experimento realizado com o efluente tratado a 15°C pelo período de 3 dias teve efeito vinculado entre o tipo de eletrodo e o tempo de tratamento, demonstrado na Figura 10.

Figura 10: Efeito vinculado ao efluente tratado a 15°C pelo período de 3 dias.



Fonte: Autor (2021).

A Figura 10 mostra que o aumento do tempo de eletrólise diminuiu o efeito do tipo de eletrodo na remoção de fósforo.

3.4.3 Residual de ferro e alumínio

Segura et al., (2018), relata em seu estudo que uma das desvantagens da aplicação de eletrocoagulação é o efluente após tratamento conter uma alta concentração de Al ou Fe, muitas vezes necessitando de pós tratamento.

Analisando os resultados de Al e Fe obtidos após a aplicação de eletrocoagulação, observamos que o efluente após o tratamento acaba ficando com uma quantidade de resíduo do eletrodo utilizado.

O único tratamento que apresentou efeito significativo no residual de metais foi no experimento com efluente tratado a 15°C, tanto em 3 dias de tratamento quanto no efluente de 10 dias.

O residual de metais não foi influenciado significativamente ($p < 0,05$) pelo tempo de tratamento e nem com a densidade de corrente utilizada, dependendo apenas do tipo de eletrodo utilizado. Os valores de ferro e alumínio não ultrapassaram os valores descritos pela legislação, sendo admitido os valores de até 5 mgL⁻¹ de alumínio e ferro. O eletrodo de ferro obteve uma maior média residual e apresentou um subproduto sólido de coloração aparente. O eletrodo de alumínio apresentou médias residuais menores, em torno de 0,82 mgL⁻¹ e permitiu uma clarificação mais rápida, mas com certa turbidez, vindo de encontro com o que foi descrito por Melchios et al., (2016).

Podemos concluir, portanto, que com base nos valores obtidos que o melhor eletrodo para ser trabalhado com efluente de soro de leite é o eletrodo de alumínio, com tempo de retenção de 40 minutos e densidade de corrente de 0,5 A/m², pois o mesmo demonstrou boa eficiência na remoção de DQO e de fósforo e baixa quantidade residual após o tratamento de eletrocoagulação.

De acordo com o CONSEMA (2017), alguns padrões são necessários para lançamento de efluentes no corpo receptor no Estado do Rio Grande do Sul. Analisando esses padrões estabelecidos, observamos que apenas com o tratamento anaeróbio não é possível descarte nos corpos hídricos devida a elevada quantidade de fósforo e elevada condutividade presente no efluente.

Para a utilização do efluente como água de reuso pela indústria, alguns parâmetros devem ser levados em consideração, como a quantidade de metais presentes e o valor de óleos e graxas. Para os metais de alumínio e ferro o valor máximo permitido é de 5 mg L⁻¹ e de óleos e graxas é de 30 mg L⁻¹, levando em consideração esses parâmetros o efluente estudado após a aplicação de eletrocoagulação pode ser utilizado para fins industriais, ou seja, utilização não potável, mas para isso se faz necessário uma análise mais completa após o referido tratamento a fim de verificar os demais parâmetros (CONSEMA, 2020).

3.4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que, dentro dos parâmetros utilizados, o reator anaeróbio foi eficiente na remoção de cor aparente, turbidez, DQO e óleos e graxas, em diferentes temperaturas.

Com temperatura de 15°C foi possível chegar a remoção de 96% na DQO em 10 dias de tratamento, e nas temperaturas de 25 e 35°C em 3 dias de tratamento obteve-se remoção de 92 e 97% respectivamente.

O tratamento por eletrocoagulação demonstrou boa eficiência na remoção de DQO e fósforo, alcançando 91% de remoção de DQO e 64% na remoção de fósforo, além de baixo valor residual de metal após tratamento.

O descarte do efluente após tratamento anaeróbio não é possível, pois o mesmo apresenta elevada quantidade de fósforo e condutividade e para a utilização do efluente em reuso, se faz necessário mais análises.

4 CONCLUSÃO

Os artigos oriundos desse trabalho de dissertação apresentam a caracterização e os estudos a respeito do efluente do soro de leite, abordando os melhores tratamentos para esse tipo de material, assim como a eficiência dos mesmos.

No segundo artigo é apresentado o artigo experimental a respeito desta dissertação, onde é possível concluir que o efluente do soro de leite apresenta elevada quantidade de matéria orgânica, representado pela DQO e elevada quantidade de nutrientes, representado pelo teor de fósforo.

O tratamento anaeróbico demonstrou eficiência na remoção de DQO, inclusive em baixas temperaturas, demonstrando que este tratamento pode ser utilizado na região Sul do Brasil com maior tempo de retenção do efluente e com rigoroso controle de temperatura.

A eletrocoagulação apresentou eficiência na remoção de DQO e fósforo, demonstrando que o tratamento de eletrocoagulação após o tratamento anaeróbico é uma boa opção de pós tratamento para o efluente do soro de leite, e o eletrodo que apresentou melhor eficiência em ambos tratamentos realizados foi o eletrodo de alumínio.

O descarte do efluente após os devidos tratamentos não é possível devida a elevada quantidade de fósforo e condutividade e para reuso na indústria de forma não potável fazem-se necessárias mais análises nos efluentes após o tratamento de eletrocoagulação.

REFERÊNCIAS

- AMADO, M. G.; TAVARES, A. P. M.; FREIRE, M. G.; SOTO, A.; RODRÍGUEZ, O. Recovery of lactose and proteins from cheese whey with poly(ethylene) glycol/sulfate aqueous two-phase systems. **Separation and Purification Technology**, v. 255, p. 117686, 2021.
- APHA, 2012. Standard Methods For The Examination of Water And Wastewater, 22nd Ed.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC.
- CARVALHO, F.; PRAZERES, A. R.; RIVAS, J. Cheese Whey wastewater: Characterization and treatment. **Science of Total Environment**, v. 445-446, p. 385-396, 2013.
- CHARALAMBOUS, P.; SHIN, J.; SHIN, S. G.; VYRIDES, I. Anaerobic digestion of industrial dairy wastewater and cheese whey: Performance of internal circulation bioreactor and laboratory batch test at pH5-6. **Renewable Energy**, n. 147, p. 1-10, 2020.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: reatores anaeróbios**. v. 5. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2008.
- CONSEMA, Conselho Estadual do Meio Ambiente. Disponível em: <<https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201803/15120855-372-2018-atividades-licenciavies-revisao-288.pdf>>. Acesso em: 28 fev. 2021.
- CONSEMA, Conselho Estadual do Meio Ambiente. Resolução CONSEMA nº 355 de 2017. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=390050>>. Acesso em: 28 fev. 2021.
- COSTA, E.S.; FILHO, O. B.; GIORDANO, G. **Reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB): Uma abordagem concisa**. 1. ed. Rio de Janeiro: Coletânea em Saneamento Ambiental, 2014, 112 p.
- DERELI, R. K.; ZEE, F. P. V.; OZTURK, I.; LIER, J. B. V. Treatment of cheese whey by a cross-flow anaerobic membrane bioreactor: Biological and filtration performance. **Environmental Research**, v. 168, p 109-117, 2019.
- EMBRAPA. **Anuário do leite 2020: leite de vacas felizes**. 3. ed. São Paulo: Texto Comunicação Corporativa, 2020, 104 p.
- FERREIRA, T. F.; SANTOS, P. A.; PAULA, A. V.; CASTRO, H. F.; ANDRADE, G. S. S. Biogas generation by hybrid treatment of dairy wastewater with lipolytic whole cell preparations and anaerobic sludge. **Biochemical Engineering Journal**, v. 169, p. 107965, 2021.
- GANJU, S.; GOGATE, P. R. A review on approaches for efficient recovery of whey proteins from dairy industry effluents. **Journal of Food Engineering**, v. 215, p. 84-96, 2017.
- JENZURA, N. T. Remoção de DQO, nitrogênio e fósforo de esgoto sanitário em reator de leite estruturado com aeração intermitente em fase única. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2017.

KOTHARI, R.; PANDEY, A K.; SUMAR, S.; TYAGI, V. V.; TYAGI, S. K. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 174-195, 2014.

LI, H.; HAN, K.; LI, Z.; ZHANG, J.; LI, H.; HUANG, Y.; SHEN, L.; LI, Q.; WANG, Y. Performance, granule conductivity and microbial community analysis of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors from mesophilic to thermophilic operation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 133, p. 59-65, 2018.

MAO, C.; FENG, Y.; WANG, X.; REN, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540-555, 2015.

MARQUARDT, L.; ROHLFES, A. L. B.; BACCAR, N. M.; OLIVEIRA, M. S. R.; RICHARDS, N. S. P. S. Indústrias lácteas: alternativas de aproveitamento do soro de leite como forma de gestão ambiental. **TECNO-LÓGICA**, v. 15, n. 2, p. 79-83, 2011.

MERKEL, A.; VOROPAEVA, D.; ONDRUSEK, M. The impact of integrated nanofiltration and electro-dialytic processes on the chemical composition of sweet and acid whey streams. **Journal of Food Engineering**, v. 298, p. 110500, 2021.

MENDOZA, D. R.; KOSMERL, E.; KRENTS, A.; ZHANG, L.; BADIGER, S.; CRUZADO, G. M.; APAZA, A. M.; GIUSTI, M.; FLORES, R. J.; CANO, I. G. Invited review: Acid whey trends and health benefits. **Journal of Dairy Science**, v. 104, n. 2, p. 1262- 1275, 2021.

PERUZZO, V. V. Estudo da acidogênese e metanogênese aplicada no tratamento da vinhaça da cana-de-açúcar. Dissertação de Mestrado. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2017.

PRAZERES, A. R.; CARVALHO, F.; RIVAS, J. Cheese whey management: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 110, p. 48-68, 2012.

PRAZERES, A. R.; CARVALHO, F.; RIVAS, J. Fenton-like application to pretreated cheese whey wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 129, p.199-205, 2013.

PRAZERES, A. R.; CARVALHO, F.; RIVAS, J.; PATANITA, M.; DÔRES, J. Reuse of pretreated cheese whey wastewater for industrial tomato production (*Lycopersicon esculentum* Mill). **Agricultural Water Management**, v. 140, p. 87-95, 2014.

REILLY, M.; COOLEY, A. P.; TITO, D.; TASSOU, S. A.; THEODOROU, M. K. Electrocoagulation treatment of dairy processing and slaughterhouse wastewaters. **Energy Procedia**, v. 161, p. 343-351, 2019.

SEGURA, S. G.; EIBAND, M. M. S. G.; MELO, J. V.; HUITLE, C. A. M. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 801, p.267-299, 2017.

TAHREEN, A.; JAMI, M. S.; ALI, F. Role of electrocoagulation in wastewater treatment : A developmental review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 37, p. 101440, 2020.

UN, U. T.; KANDEMIR, A.; ERGINEL, N.; OCAL, S. E. Continuous electrocoagulation of cheese whey wastewater: An application of Response Surface Methodology. **Journal of Environmental Management**, v. 146, p. 245-250, 2014.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. Tratamento anaeróbio de esgoto: um manual para regiões de clima quente. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1994.

WALTHAM, B.; ORMECI, B. Fluorescence intensity, conductivity, and UV-vis absorbance as surrogate parameters for real-time monitoring of anaerobic digestion of wastewater sludge. **Journal of Water Process Engineering**, v. 37, p. 101395, 2020.

WIMMER, A. C. S. **Aplicação do processo eletrolítico no tratamento de efluente de uma indústria petroquímica**. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2007.

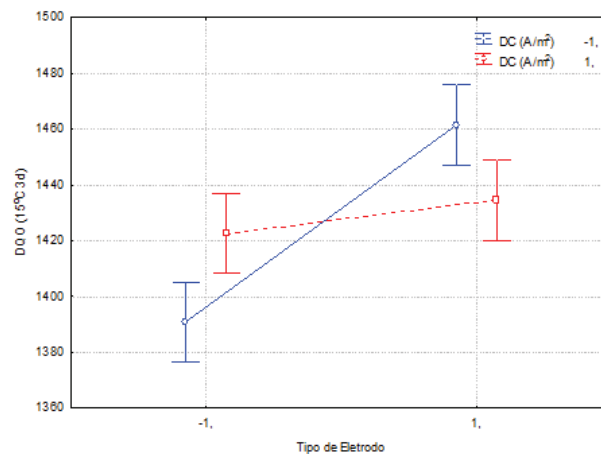
ZANIN, A. **Tratamento anaeróbio em escala piloto de efluente de beneficiamento do soro de leite**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo/RS, 2019.

ANEXO A

Resultado dos tratamentos avaliados pela ANOVA para DQO.
DQO (15°C, 3d)

Effect Estimates; Var.:DQO (15oC 3d); R-sqr=,95326; Adj:,9221 (Dados DQO) 2**(3-0) design; MS Residual=159,3611 DV: DQO (15oC 3d)										
Mean/Interc.	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
(1)Tipo de Eletrodo	1427,375	3,155958	452,2795	0,000000	1420,236	1434,514	1427,375	3,155958	1420,236	1434,514
(2)Tempo (min)	41,250	6,311916	6,5353	0,000107	26,971	55,529	20,625	3,155958	13,486	27,764
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	-67,250	6,311916	-10,6545	0,000002	-81,529	-52,971	-33,625	3,155958	-40,764	-26,486
1 by 2	2,250	6,311916	0,3565	0,729704	-12,029	16,529	1,125	3,155958	-6,014	8,264
1 by 3	6,250	6,311916	0,9902	0,347954	-8,029	20,529	3,125	3,155958	-4,014	10,264
2 by 3	-29,250	6,311916	-4,6341	0,001230	-43,529	-14,971	-14,625	3,155958	-21,764	-7,486
	-13,750	6,311916	-2,1784	0,057322	-28,029	0,529	-6,875	3,155958	-14,014	0,264

Factor	ANOVA; Var.: DQO (15°C 3d); R-sqr=,95326; Adj.: 9221 (Dados DQO 2**(3-0) design; MS Residual=159,3611 DV: DQO (15°C 3d)				
	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	6806,25	1	6806,25	42,709	0,000107
(2)Tempo (min)	18090,25	1	18090,25	113,5173	0,000002
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	20,25	1	20,25	0,1271	0,729704
1 by 2	156,25	1	156,25	0,9805	0,347954
1 by 3	3422,25	1	3422,25	21,4748	0,001230
2 by 3	756,25	1	756,25	4,7455	0,057322
Error	1434,25	9	159,36		
Total SS	30685,75	15			



DQO (15°C, 10d)

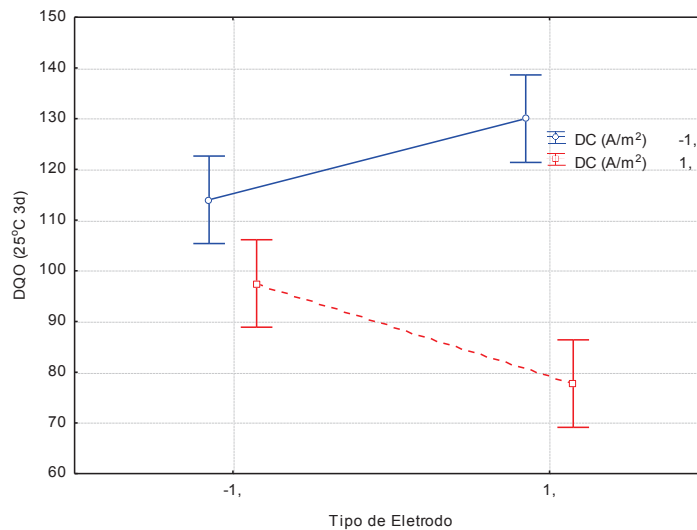
Effect Estimates; Var.:DQO (15°C 10d); R-sqr=,92471; Adj.:87452 (Dados DQO) 2**(3-0) design; MS Residual=23,80556 DV: DQO (15oC 10d)										
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	45,1250	1,219773	36,99458	0,000000	42,3657	47,88432	45,12500	1,219773	42,3657	47,88432
(1)Tipo de Eletrodo	17,2500	2,439547	7,07099	0,000058	11,7314	22,76864	8,62500	1,219773	5,8657	11,38432
(2)Tempo (min)	- 10,7500	2,439547	-4,40656	0,001704	- 16,2686	-5,23136	-5,37500	1,219773	-8,1343	-2,61568
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	- 14,7500	2,439547	-6,04620	0,000191	- 20,2686	-9,23136	-7,37500	1,219773	- 10,1343	-4,61568
1 by 2	-1,7500	2,439547	-0,71735	0,491358	-7,2686	3,76864	-0,87500	1,219773	-3,6343	1,88432
1 by 3	-4,7500	2,439547	-1,94708	0,083356	- 10,2686	0,76864	-2,37500	1,219773	-5,1343	0,38432
2 by 3	1,2500	2,439547	0,51239	0,620715	-4,2686	6,76864	0,62500	1,219773	-2,1343	3,38432

Factor	ANOVA; Var.: DQO (15°C 10d); R-sqr=,92471; Adj.:87452 (Dados DQO 2**(3-0) design; MS Residual=23,80556 DV: DQO (15°C 10d)				
	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	1190,250	1	1190,250	49,99883	0,000058
(2)Tempo (min)	462,250	1	462,250	19,41774	0,001704
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	870,250	1	870,250	36,55659	0,000191
1 by 2	12,150	1	12,250	0,51459	0,491358
1 by 3	90,250	1	90,250	3,79113	0,083356
2 by 3	6,250	1	6,250	0,26254	0,620715
Error	214,250	9	23,806		
Total SS	2845,750	15			

DQO (25°C, 3d)

Effect Estimates; Var.:DQO (25°C 3d); R-sqr=,9426; Adj.:90433 (Dados DQO) 2**(3-0) design; MS Residual=58,17361 DV: DQO (25oC 3d)										
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	104,8125	1,906791	54,96802	0,000000	100,4990	109,1260	104,8125	1,906791	100,4990	109,1260
(1)Tipo de Eletrodo	-1,8750	3,813581	-0,49166	0,634725	-10,5019	6,7519	-0,9375	1,906791	-5,2510	3,3760
(2)Tempo (min)	-24,6250	3,813581	-6,45718	0,000117	-33,2519	-15,9981	-12,3125	1,906791	-16,6260	-7,9990
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	-34,3750	3,813581	-9,01384	0,000008	-43,0019	-25,7481	-17,1875	1,906791	-21,5010	-12,8740
1 by 2	4,3750	3,813581	1,14722	0,280874	-4,2519	13,0019	2,1875	1,906791	-2,1260	6,5010
1 by 3	-17,8750	3,813581	-4,68720	0,001141	-26,5019	-9,2481	-8,9375	1,906791	-13,2510	-4,6240
2 by 3	4,3750	3,813581	1,14722	0,280874	-4,2519	13,0019	2,1875	1,906791	-2,1260	6,5010

ANOVA; Var.: DQO (25°C 3d); R-sqr=,9426; Adj.:90433 (Dados DQO 2**(3-0) design; MS Residual=58,17361 DV: DQO (25°C 3d)					
Factor	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	14,062	1	14,062	0,24173	0,634725
(2)Tempo (min)	2425,563	1	2425,563	41,69524	0,000117
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	4726,563	1	4726,563	81,24925	0,000008
1 by 2	76,563	1	76,563	1,31610	0,280874
1 by 3	1278,063	1	1278,063	21,96980	0,001141
2 by 3	76,562	1	76,562	1,31610	0,280874
Error	523,562	9	58,174		
Total SS	9120,938	15			



DQO (25°C, 10d)

Effect Estimates; Var.:DQO (25°C 10d); R-sqr=,69781; Adj.:49635 (Dados DQO) 2**(3-0) design; MS Residual=130,1736 DV: DQO (25°C 10d)										
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	97,8125	2,852341	34,29200	0,000000	91,3601	104,2649	97,81250	2,852341	91,3601	104,2649
(1)Tipo de Eletrodo	-2,3750	5,704683	-0,41632	0,686925	-15,2799	10,5299	-1,18750	2,852341	-7,6399	5,2649
(2)Tempo (min)	-17,3750	5,704683	-3,04574	0,013888	-30,2799	-4,4701	-8,68750	2,852341	-15,1399	-2,2351
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	-11,1250	5,704683	-1,95015	0,082946	-24,0299	1,7799	-5,56250	2,852341	-12,0149	0,8899
1 by 2	-12,3750	5,704683	-2,16927	0,058183	-25,2799	0,5299	-6,18750	2,852341	-12,6399	0,2649
1 by 3	-3,6250	5,704683	-0,63544	0,540957	-16,5299	9,2799	-1,81250	2,852341	-8,2649	4,6399
2 by 3	8,8750	5,704683	1,55574	0,154194	-4,0299	21,7799	4,43750	2,852341	-2,0149	10,8899

Factor	ANOVA; Var.: DQO (25°C 10d); R-sqr=,69781; Adj.:49635 (Dados DQO 2**(3-0) design; MS Residual=130,1736 DV: DQO (25°C 10d)				
	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	22,563	1	22,563	0,173326	0,686925
(2)Tempo (min)	1207,562	1	1207,562	9,276554	0,013888
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	495,063	1	495,063	3,803094	0,082946
1 by 2	612,563	1	612,563	4,705735	0,058183
1 by 3	52,562	1	52,562	0,403788	0,540957
2 by 3	315,062	1	315,062	2,420325	0,154194
Error	1171,562	9	130,174		
Total SS	3876,937	15			

DQO (35°C, 3d)

Effect Estimates; Var.:DQO (35°C 3d); R-sqr=,72192; Adj.:53654 (Dados DQO) 2**(3-0) design; MS Residual=61,5434 DV: DQO (35°C 3d)										
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	90,3438	1,961240	46,06461	0,000000	85,9071	94,78038	90,34375	1,961240	85,9071	94,78038
(1)Tipo de Eletrodo	-9,9375	3,922480	-2,53347	0,032052	-18,8108	-1,06423	-4,96875	1,961240	-9,4054	-0,53212
(2)Tempo (min)	-12,3125	3,922480	-3,13896	0,011948	-21,1858	-3,43923	-6,15625	1,961240	-10,5929	-1,71962
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	-10,1875	3,922480	-2,59721	0,028870	-19,0608	-1,31423	-5,09375	1,961240	-9,5304	-0,65712
1 by 2	0,0625	3,922480	0,01593	0,987635	-8,8108	8,93577	0,03125	1,961240	-4,4054	4,46788
1 by 3	-0,0625	3,922480	-0,01593	0,987635	-8,9358	8,81077	-0,03125	1,961240	-4,4679	4,40538
2 by 3	2,3125	3,922480	0,58955	0,569994	-6,5608	11,18577	1,15625	1,961240	-3,2804	5,59288

Factor	ANOVA; Var.: DQO (35°C 3d); R-sqr=,72192; Adj.:53654 (Dados DQO 2**(3-0) design; MS Residual=61,5434 DV: DQO (35°C 3d)				
	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	395,016	1	395,016	6,418489	0,032052
(2)Tempo (min)	606,391	1	606,391	9,853057	0,011948
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	415,141	1	415,141	6,745494	0,028870
1 by 2	0,016	1	0,016	0,000254	0,987635
1 by 3	0,016	1	0,016	0,000254	0,987635
2 by 3	21,391	1	21,391	0,347570	0,569994
Error	553,892	9	61,5434		
Total SS	1991,859	15			

DQO (35°C, 10d)

Effect Estimates; Var.:DQO (35°C 10d); R-sqr=,7109; Adj.:51817 (Dados DQO) 2**(3-0) design; MS Residual=82,58507 DV: DQO (35°C 10d)										
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	83,7813	2,271908	36,87704	0,000000	78,6418	88,92066	83,78125	2,271908	78,6418	88,92066
(1)Tipo de Eletrodo	-12,8125	4,543816	-2,81977	0,020055	-23,0913	-2,53367	-6,40625	2,271908	-11,5457	-1,26684
(2)Tempo (min)	-13,6875	4,543816	-3,01234	0,014660	-23,9663	-3,40867	-6,84375	2,271908	-11,9832	-1,70434
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	-2,1875	4,543816	-0,48142	0,641705	-12,4663	8,09133	-1,09375	2,271908	-6,2332	4,04566
1 by 2	-6,0625	4,543816	-1,33423	0,214902	-16,3413	4,21633	-3,03125	2,271908	-8,1707	2,10816
1 by 3	7,9375	4,543816	1,74688	0,114605	-2,3413	18,21633	3,96875	2,271908	-1,1707	9,10816
2 by 3	-0,9375	4,543816	-0,20632	0,841130	-11,2163	9,34133	-0,46875	2,271908	-5,6082	4,67066

Factor	ANOVA; Var.: DQO (35°C 10d); R-sqr=,7109; Adj.:51817 (Dados DQO 2**(3-0) design; MS Residual=82,58507 DV: DQO (35°C 10d)				
	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	656,641	1	656,641	7,951082	0,020055
(2)Tempo (min)	749,391	1	749,391	9,074166	0,014660
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	19,141	1	19,141	0,231769	0,641705
1 by 2	147,016	1	147,016	1,780172	0,214902
1 by 3	252,016	1	252,016	3,051588	0,114605
2 by 3	3,516	1	3,516	0,042570	0,841130
Error	743,266	9	82,5851		
Total SS	2570,984	15			

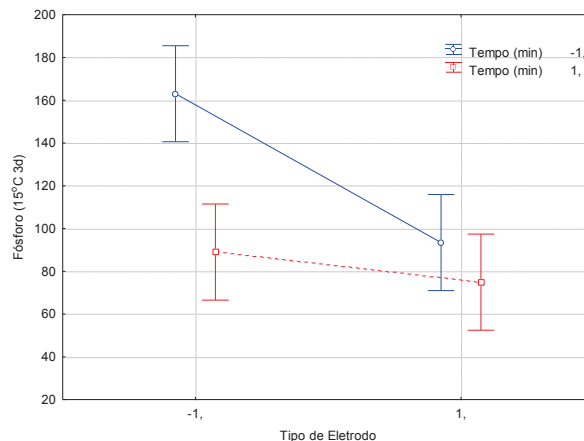
ANEXO B

Resultado dos tratamentos avaliados pela ANOVA para fósforo.

Fósforo (15°C, 3d)

Effect Estimates; Var.:Fósforo (15°C 3d); R-sqr=,84925; Adj.,74875 (Dados residuais de Fósforo) 2**(3-0) design; MS Residual=394,6176 DV: Fósforo (15oC 3d)										
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	105,1156	4,966246	21,16601	0,000000	93,8812	116,3501	105,1156	4,966246	93,8812	116,3501
(1)Tipo de Eletrodo	-41,8413	9,932492	-4,21256	0,002264	-64,3101	-19,3724	-20,9206	4,966246	-32,1551	-9,6862
(2)Tempo (min)	-46,2813	9,932492	-4,65958	0,001186	-68,7501	-23,8124	-23,1406	4,966246	-34,3751	-11,9062
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	-5,8512	9,932492	-0,58910	0,570282	-28,3201	16,6176	-2,9256	4,966246	-14,1601	8,3088
1 by 2	27,7713	9,932492	2,79600	0,020848	5,3024	50,2401	13,8856	4,966246	2,6512	25,1201
1 by 3	-6,7388	9,932492	-0,67846	0,514548	-29,2076	15,7301	-3,3694	4,966246	-14,6038	7,8651
2 by 3	16,0713	9,932492	1,61805	0,140106	-6,3976	38,5401	8,0356	4,966246	-3,1988	19,2701

ANOVA; Var.: Fósforo (15°C 3d); R-sqr=,84925; Adj.,74875 (Dados Res. Fósforo 2**(3-0) design; MS Residual=394,6176 DV: Fósforo (15°C 3d)					
Factor	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	7002,76	1	7002,76	17,74569	0,002264
(2)Tempo (min)	8567,82	1	8567,82	21,71170	0,001186
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	136,95	1	136,95	0,34704	0,570282
1 by 2	3084,97	1	3084,97	7,81762	0,020848
1 by 3	181,64	1	181,64	0,46030	0,514548
2 by 3	1033,14	1	1033,14	0,46030	0,514548
Error	3551,56	9	394,618	2,61808	0,140106
Total SS	23558,84	15			



Fósforo (15°C, 10d)

Effect Estimates; Var.:Fósforo (15°C 10d); R-sqr=,44202; Adj:,07003 (Dados residuais de Fósforo) 2**(3-0) design; MS Residual=58,20353 DV: Fósforo (15oC 10d)										
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	77,67000	1,907281	40,72290	0,000000	73,3554	81,98457	77,67000	1,907281	73,35543	81,98457
(1)Tipo de Eletrodo	1,08250	3,814562	0,28378	0,782998	-7,5466	9,71164	0,54125	1,907281	-3,77332	4,85582
(2)Tempo (min)	-7,82500	3,814562	-2,05135	0,070460	-16,4541	0,80414	-3,91250	1,907281	-8,22707	0,40207
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	-4,57000	3,814562	-1,19804	0,261498	-13,1991	4,05914	-2,28500	1,907281	-6,59957	2,02957
1 by 2	-4,04750	3,814562	-1,06107	0,316303	-12,6766	4,58164	-2,02375	1,907281	-6,33832	2,29082
1 by 3	-1,97250	3,814562	-0,51710	0,617555	-10,6016	6,65664	-0,98625	1,907281	-5,30082	3,32832
2 by 3	0,42500	3,814562	0,11142	0,913732	-8,2041	9,05414	0,21250	1,907281	-4,10207	4,52707

ANOVA; Var.: Fósforo (15°C 10d); R-sqr=,44202; Adj:,07003 (Dados Res. Fósforo 2**(3-0) design; MS Residual=58,20353 DV: Fósforo (15°C 3d)					
Factor	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	4,6872	1	4,6872	0,080532	0,782998
(2)Tempo (min)	244,9225	1	244,9225	4,208036	0,070460
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	83,5396	1	83,5396	1,435301	0,261498
1 by 2	65,5290	1	65,5290	1,125860	0,316303
1 by 3	15,5630	1	15,5630	0,267390	0,617555
2 by 3	0,7225	1	0,7225	0,012413	0,913732
Error	523,8317	9	58,2035		
Total SS	939,7956	15			

Fósforo (25°C, 3d)

Effect Estimates; Var.:Fósforo (25°C 3d); R-sqr=,87339; Adj:,78899 (Dados residuais de Fósforo) 2**(3-0) design; MS Residual=108,1046 DV: Fósforo (25oC 3d)										
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	107,2262	2,599335	41,25142	0,000000	101,3461	113,1064	107,2262	2,599335	101,3461	113,1064
(1)Tipo de Eletrodo	-38,2125	5,198669	-7,35044	0,000043	-49,9727	-26,4523	-19,1062	2,599335	-24,9864	-13,2261
(2)Tempo (min)	-12,1425	5,198669	-2,33569	0,044332	-23,9027	-0,3823	-6,0713	2,599335	-11,9514	-0,1911
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	0,2975	5,198669	0,05723	0,955615	-11,4627	12,0577	0,1488	2,599335	-5,7314	6,0289
1 by 2	-5,9275	5,198669	-1,14020	0,283638	-17,6877	5,8327	-2,9638	2,599335	-8,8439	2,9164
1 by 3	4,7425	5,198669	0,91225	0,385420	-7,0177	16,5027	2,3713	2,599335	-3,5089	8,2514
2 by 3	3,5525	5,198669	0,68335	0,511594	-8,2077	15,3127	1,7763	2,599335	-4,1039	7,6564

ANOVA; Var.: Fósforo (25°C 3d); R-sqr=,87339; Adj.:78899 (Dados Res. Fósforo 2**(3-0) design; MS Residual=108,1046 DV: Fósforo (25°C 3d)					
Factor	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	5840,781	1	5840,781	54,02895	0,000043
(2)Tempo (min)	589,761	1	589,761	5,45547	0,044332
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	0,354	1	0,354	0,00327	0,955615
1 by 2	140,541	1	140,541	1,30005	0,283638
1 by 3	89,965	1	89,965	0,83220	0,385420
2 by 3	50,481	1	50,481	0,46696	0,511594
Error	972,942	9	108,105		
Total SS	7684,825	15			

Fósforo (25°C, 10d)

Effect Estimates; Var.:Fósforo (25°C 10d); R-sqr=,74979; Adj.:58298 (Dados residuais de Fósforo) 2**(3-0) design; MS Residual=120,7752 DV: Fósforo (25°C 10d)										
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	100,9325	2,747444	36,73687	0,000000	94,7173	107,1477	100,9325	2,747444	94,7173	107,1477
(1)Tipo de Eletrodo	-11,7050	5,494889	-2,13016	0,062005	-24,1353	0,7253	-5,8525	2,747444	-12,0677	0,3627
(2)Tempo (min)	-22,0700	5,494889	-4,01646	0,003034	-34,5003	-9,6397	-11,0350	2,747444	-17,2502	-4,8198
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	5,7750	5,494889	1,05098	0,320669	-6,6553	18,2053	2,8875	2,747444	-3,3277	9,1027
1 by 2	-4,0000	5,494889	-0,72795	0,485151	-16,4303	8,4303	-2,0000	2,747444	-8,2152	4,2152
1 by 3	10,8150	5,494889	1,96819	0,080576	-1,6153	23,2453	5,4075	2,747444	-0,8077	11,6227
2 by 3	-4,8900	5,494889	-0,88992	0,396674	-17,3203	7,5403	-2,4450	2,747444	-8,6602	3,7702

ANOVA; Var.: Fósforo (25°C 10d); R-sqr=,74979; Adj.:58298 (Dados Res. Fósforo 2**(3-0) design; MS Residual=120,7752 DV: Fósforo (25°C 10d)					
Factor	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	548,028	1	548,028	4,53759	0,062005
(2)Tempo (min)	1948,340	1	1948,340	16,13195	0,003034
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	133,403	1	133,403	1,10455	0,320669
1 by 2	64,000	1	64,000	0,52991	0,485151
1 by 3	467,857	1	467,857	3,87378	0,080576
2 by 3	95,648	1	95,648	0,79195	0,396674
Error	1086,977	9	120,775		
Total SS	4344,252	15			

Fósforo (35°C, 3d)

Effect Estimates; Var.:Fósforo (35°C 3d); R-sqr=,82962; Adj.:71604 (Dados residuais de Fósforo) 2**(3-0) design; MS Residual=61,70206 DV: Fósforo (35oC 3d)										
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	90,3450	1,963766	46,00598	0,000000	85,9027	94,7873	90,3450	1,963766	85,9027	94,78735
(1)Tipo de Eletrodo	-22,5150	3,927533	-5,73261	0,000282	-31,3997	-13,6303	-11,2575	1,963766	-15,6998	-6,81515
(2)Tempo (min)	-9,7750	3,927533	-2,48884	0,034488	-18,6597	-0,8903	-4,8875	1,963766	-9,3298	-0,44515
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	4,1450	3,927533	1,05537	0,318762	-4,7397	13,0297	2,0725	1,963766	-2,3698	6,51485
1 by 2	-1,4800	3,927533	-0,37683	0,715033	-10,3647	7,4047	-0,7400	1,963766	-5,1823	3,70235
1 by 3	-4,7400	3,927533	-1,20686	0,258247	-13,6247	4,1447	-2,3700	1,963766	-6,8123	2,07235
2 by 3	-5,6300	3,927533	-1,43347	0,185535	-14,5147	3,2547	-2,8150	1,963766	-7,2573	1,62735

Factor	ANOVA; Var.: Fósforo (35°C 3d); R-sqr=,82962; Adj.:71604 (Dados Res. Fósforo 2**(3-0) design; MS Residual=61,70206 DV: Fósforo (35°C 3d)				
	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	2027,701	1	2027,701	32,86278	0,000282
(2)Tempo (min)	382,202	1	382,202	6,19432	0,034488
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	68,724	1	68,724	1,11381	0,318762
1 by 2	8,762	1	8,762	0,14200	0,715033
1 by 3	89,870	1	89,870	1,45652	0,258247
2 by 3	126,788	1	126,788	2,05484	0,185535
Error	555,318	9	61,702		
Total SS	3259,366	15			

Fósforo (35°C, 10d)

Effect Estimates; Var.:Fósforo (35°C 10d); R-sqr=,63837; Adj.:39729 (Dados residuais de Fósforo) 2**(3-0) design; MS Residual=148,7545 DV: Fósforo (35oC 10d)										
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	102,4875	3,049124	33,61211	0,000000	95,5899	109,3851	102,4875	3,049124	95,5899	109,3851
(1)Tipo de Eletrodo	-22,5150	6,098248	-3,69204	0,004982	-36,3102	-8,7198	-11,2575	3,049124	-18,1551	-4,3599
(2)Tempo (min)	-7,7050	6,098248	-1,26348	0,238164	-21,5002	6,0902	-3,8525	3,049124	-10,7501	3,0451
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	-2,3700	6,098248	-0,38864	0,706579	-16,1652	11,4252	-1,1850	3,049124	-8,0826	5,7126
1 by 2	-1,1850	6,098248	-0,19432	0,850242	-14,9802	12,6102	-0,5925	3,049124	-7,4901	6,3051
1 by 3	2,9600	6,098248	0,48539	0,639000	-10,8352	16,7552	1,4800	3,049124	-5,4176	8,3776
2 by 3	-2,9600	6,098248	-0,48539	0,639000	-16,7552	10,8352	-1,4800	3,049124	-8,3776	5,4176

Factor	ANOVA; Var.: Fósforo (35°C 10d); R-sqr=,63837; Adj.,39729 (Dados Res. Fósforo 2**(3-0) design; MS Residual=148,7545 DV: Fósforo (35°C 10d)				
	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	2027,701	1	2027,701	13,63119	0,004982
(2)Tempo (min)	237,468	1	237,468	1,59638	0,238164
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	22,468	1	22,468	0,15104	0,706579
1 by 2	5,617	1	5,617	0,03776	0,850242
1 by 3	35,046	1	35,046	0,23560	0,639000
2 by 3	35,046	1	35,046	0,23560	0,639000
Error	1338,791	9	148,755		

ANEXO C

Resultado dos tratamentos avaliados pela ANOVA para resíduo de metal.

Resíduo de metal (15°C, 3d)

Effect Estimates; Var.:Residual de metal (15°C 3d); R-sqr=.97591; Adj.:83138 (Dados residuais de Fe e Al) 2**(3-0) design; MS Residual=,18605 DV: Residual de metal (15oC 3d)										
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	1,23500	0,152500	8,09836	0,078215	-0,70270	3,172696	1,235000	0,152500	-0,70270	3,172696
(1)Tipo de Eletrodo	-1,40000	0,305000	-4,59016	0,136558	-5,27539	2,475392	-0,700000	0,152500	-2,63770	1,237696
(2)Tempo (min)	-0,46500	0,305000	-1,52459	0,369571	-4,34039	3,410392	-0,232500	0,152500	-2,17020	1,705196
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	-0,72000	0,305000	-2,36066	0,255089	-4,59539	3,155392	-0,360000	0,152500	-2,29770	1,577696
1 by 2	0,47500	0,305000	1,55738	0,363386	-3,40039	4,350392	0,237500	0,152500	-1,70020	2,175196
1 by 3	0,92000	0,305000	3,01639	0,203794	-2,95539	4,795392	0,460000	0,152500	-1,47770	2,397696
2 by 3	-0,04500	0,305000	-0,14754	0,906745	-3,92039	3,830392	-0,022500	0,152500	-1,96020	1,915196

ANOVA; Var.: Residual de metal (15°C 3d); R-sqr=.97591; Adj.:83138 (Dados Residual de metal 2**(3-0) design; MS Residual=,18605 DV: Residual de metal (15°C 3d)					
Factor	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	3,920000	1	3,920000	21,06960	0,136558
(2)Tempo (min)	0,432450	1	0,432450	2,32438	0,369571
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	1,036800	1	1,036800	5,57270	0,255089
1 by 2	0,451250	1	0,451250	2,42542	0,363386
1 by 3	1,692800	1	1,692800	9,09863	0,203794
2 by 3	0,004050	1	0,004050	0,02177	0,906745
Error	0,186050	1	0,186050		
Total SS	7,723400	7			

Resíduo de metal (15°C, 10d)

Não há resultado para resíduo de metal no tratamento realizado em 15°C pelo período de 10 dias.

Resíduo de metal (25°C, 3d)

Effect Estimates; Var.:Residual de metal (25oC 3d); R-sqr=,99762; Adj.:98333 (Dados residuais de Fe e Al) 2**(3-0) design; MS Residual=,03645 DV: Residual de metal (25oC 3d)										
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	2,01250	0,067500	29,8148	0,021344	1,15483	2,870169	2,01250	0,067500	1,15483	2,870169
(1)Tipo de Eletrodo	-2,36500	0,135000	-17,5185	0,036300	-4,08034	-0,649662	-1,18250	0,067500	-2,04017	-0,324831
(2)Tempo (min)	1,00000	0,135000	7,4074	0,085427	-0,71534	2,715338	0,50000	0,067500	-0,35767	1,357669
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	0,43000	0,135000	3,1852	0,193665	-1,28534	2,145338	0,21500	0,067500	-0,64267	1,072669
1 by 2	-0,83000	0,135000	-6,1481	0,102648	-2,54534	0,885338	-0,41500	0,067500	-1,27267	0,442669
1 by 3	-0,39000	0,135000	-2,8889	0,212150	-2,10534	1,325338	-0,19500	0,067500	-1,05267	0,662669
2 by 3	0,12500	0,135000	0,9259	0,524473	-1,59034	1,840338	0,06250	0,067500	-0,79517	0,920169

Factor	ANOVA; Var.: Residual de metal (25°C 3d); R-sqr=,99762; Adj.:98333 (Dados Residual de metal 2**(3-0) design; MS Residual=,03645 DV: Residual de metal (25°C 3d)				
	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	11,18645	1	11,18645	306,8985	0,036300
(2)Tempo (min)	2,00000	1	2,00000	54,8697	0,085427
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	0,36980	1	0,36980	10,1454	0,193665
1 by 2	1,37780	1	1,37780	37,7997	0,102648
1 by 3	0,30420	1	0,30420	8,3457	0,212150
2 by 3	0,03125	1	0,03125	0,8573	0,524473
Error	0,03645	1	0,03645		
Total SS	15,30595	7			

Resíduo de metal (25°C, 10d)

Effect Estimates; Var.:Residual de metal (25oC 10d); R-sqr=,99843; Adj.:98904 (Dados residuais de Fe e Al) 2**(3-0) design; MS Residual=,02205 DV: Residual de metal (25oC 10d)										
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	2,16250	0,052500	41,1905	0,015452	1,49542	2,82958	2,16250	0,052500	1,49542	2,829576
(1)Tipo de Eletrodo	-2,47000	0,105000	-23,5238	0,027046	-3,80415	-1,13585	-1,23500	0,052500	-1,90208	-0,567924
(2)Tempo (min)	0,12500	0,105000	1,1905	0,444781	-1,20915	1,45915	0,06250	0,052500	-0,60458	0,729576
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	0,69000	0,105000	6,5714	0,096139	-0,64415	2,02415	0,34500	0,052500	-0,32208	1,012076
1 by 2	-0,09000	0,105000	-0,8571	0,548875	-1,42415	1,24415	-0,04500	0,052500	-0,71208	0,622076
1 by 3	-0,64500	0,105000	-6,1429	0,102735	-1,97915	0,68915	-0,32250	0,052500	-0,98958	0,344576
2 by 3	0,11000	0,105000	1,0476	0,485198	-1,22415	1,44415	0,05500	0,052500	-0,61208	0,722076

Factor	ANOVA; Var.: Residual de metal (25°C 10d); R-sqr=,99843; Adj.:98904 (Dados Residual de metal 2**(3-0) design; MS Residual=0,2205 DV: Residual de metal (25°C 10d)				
	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	12,20180	1	12,20180	553,3696	0,027046
(2)Tempo (min)	0,03125	1	0,03125	1,4172	0,444781
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	0,95220	1	0,95220	43,1837	0,096139
1 by 2	0,01620	1	0,01620	0,7347	0,548875
1 by 3	0,83205	1	0,83205	37,7347	0,102735
2 by 3	0,02420	1	0,02420	1,0975	0,485198
Error	0,02205	1	0,02205		

Resíduo de metal (35°C, 3d)

Effect Estimates; Var.:Residual de metal (35oC 3d); R-sqr=,9822; Adj.:,87538 (Dados residuais de Fe e Al) 2**(3-0) design; MS Residual=,0190125 DV: Residual de metal (35oC 3d)										
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	-95,%	+95,%	Coeff.	Std.Err.	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	0,966250	0,048750	19,82051	0,032092	0,34682	1,585677	0,966250	0,048750	0,346823	1,585677
(1)Tipo de Eletrodo	-0,087500	0,097500	-0,89744	0,534378	-1,32635	1,151355	-0,043750	0,048750	-0,663177	0,575677
(2)Tempo (min)	0,322500	0,097500	3,30769	0,186905	-0,91635	1,561355	0,161250	0,048750	-0,458177	0,780677
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	0,412500	0,097500	4,23077	0,147762	-0,82635	1,651355	0,206250	0,048750	-0,413177	0,825677
1 by 2	-0,317500	0,097500	-3,25641	0,189678	-1,55635	0,921355	-0,158750	0,048750	-0,778177	0,460677
1 by 3	-0,367500	0,097500	-3,76923	0,165096	-1,60635	0,871355	-0,183750	0,048750	-0,803177	0,435677
2 by 3	0,082500	0,097500	0,84615	0,552929	-1,15635	1,321355	0,041250	0,048750	-0,578177	0,660677

Factor	ANOVA; Var.: Residual de metal (35°C 3d); R-sqr=,9822; Adj.:,87538 (Dados Residual de metal 2**(3-0) design; MS Residual=,190125 DV: Residual de metal (35°C 3d)				
	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	0,015312	1	0,015312	0,80539	0,534378
(2)Tempo (min)	0,208012	1	0,208012	10,94083	0,186905
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	0,340312	1	0,340312	17,89941	0,147762
1 by 2	0,201613	1	0,201613	10,60421	0,189678
1 by 3	0,270112	1	0,270112	14,20710	0,165096
2 by 3	0,013612	1	0,013612	0,71598	0,552929
Error	0,019012	1	0,019012		
Total SS	1,067987	7			

Resíduo de metal (35°C, 10d)

Anova; Var.:Residual de metal (35°C 3d); R-sqr=,9822; Adj:,87538 (Dados residuais de Fe e Al) 2**(3-0) design; MS Residual=,0190125 DV: Residual de metal (35oC 3d)					
	SS	df	MS	F	p
(1)Tipo de Eletrodo	0,015312	1	0,015312	0,80539	0,534378
(2)Tempo (min)	0,208012	1	0,208012	10,94083	0,186905
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	0,340312	1	0,340312	17,89941	0,147762
1 by 2	0,201613	1	0,201613	10,60421	0,189678
1 by 3	0,270112	1	0,270112	14,20710	0,165096
2 by 3	0,013612	1	0,013612	0,71598	0,552929
Error	0,019012	1	0,019012		
Total SS	1,067987	7			

ANOVA; Var.: Residual de metal (35°C 3d); R-sqr=,99459; Adj:,96215 (Dados Residual de metal 2**(3-0) design; MS Residual=,0630125 DV: Residual de metal (35°C 3d)					
Factor	SS	Df	MS	F	P
(1)Tipo de Eletrodo	5,561112	1	5,561112	88,25412	0,067512
(2)Tempo (min)	1,629012	1	1,629012	25,85221	0,123630
(3)Densidade de Corrente (A/m2)	1,073112	1	1,073112	17,03015	0,151349
1 by 2	1,891512	1	1,891512	30,01805	0,114930
1 by 3	1,419613	1	1,419613	22,52906	0,132191
2 by 3	0,015313	1	0,015313	0,24301	0,708429
Error	0,063012	1	0,063012		

ANEXO D

Tabela: Análise da variância das variáveis (tipo de eletrodo, tempo de retenção e densidade de corrente) na remoção de DQO.

Temperatura (°C)	Tempo de tratamento anaeróbio (d)	Variáveis independentes	Efeito	p
15	3	Tipo de eletrodo	41,25	0,000107
		Tempo (min)	-67,25	0,000002
		Densidade de corrente (A/m ²)	2,25	0,729704
	10	Tipo de eletrodo	17,25	0,000058
		Tempo (min)	-10,75	0,001704
		Densidade de corrente (A/m ²)	-14,75	0,000191
25	3	Tipo de eletrodo	-1,88	0,634725
		Tempo (min)	-24,63	0,000117
		Densidade de corrente (A/m ²)	-34,38	0,000008
	10	Tipo de eletrodo	-2,38	0,686925
		Tempo (min)	-17,38	0,013888
		Densidade de corrente (A/m ²)	-11,13	0,082946
35	3	Tipo de eletrodo	-9,94	0,032052
		Tempo (min)	-12,31	0,011948
		Densidade de corrente (A/m ²)	-10,19	0,028870
	10	Tipo de eletrodo	-12,81	0,020055
		Tempo (min)	-13,69	0,014660
		Densidade de corrente (A/m ²)	-2,19	0,641705

Fonte: Autor (2021).

Tabela: Análise da variância das variáveis (tipo de eletrodo, tempo de retenção e densidade de corrente) na remoção de fósforo.

Temperatura (°C)	Tempo de tratamento anaeróbio (d)	Variáveis independentes	Efeito	p
15	3	Tipo de eletrodo	-41,84	0,002264
		Tempo (min)	-46,28	0,001180
		Densidade de corrente (A/m ²)	-5,85	0,570282
	10	Tipo de eletrodo	1,08	0,782998
		Tempo (min)	-7,83	0,070460
		Densidade de corrente (A/m ²)	-4,57	0,261498
25	3	Tipo de eletrodo	-38,21	0,000043
		Tempo (min)	-12,14	0,044332
		Densidade de corrente (A/m ²)	0,30	0,955615
	10	Tipo de eletrodo	-11,71	0,062005
		Tempo (min)	-22,07	0,003034
		Densidade de corrente (A/m ²)	5,78	0,320669
35	3	Tipo de eletrodo	-22,52	0,000282
		Tempo (min)	-9,78	0,034482
		Densidade de corrente (A/m ²)	4,15	0,318762
	10	Tipo de eletrodo	-22,52	0,004982
		Tempo (min)	-7,71	0,238164
		Densidade de corrente (A/m ²)	-2,37	0,706579

Fonte: Autor (2021).

Tabela: Análise de residual de alumínio e ferro após tratamento eletrolítico.

Temperatura (°C)	Tempo de tratamento anaeróbio (d)	Variáveis independentes	Efeito	p
15	3	Tipo de eletrodo	-1,4	0,136558
		Tempo (min)	-0,47	0,369571
		Densidade de corrente (A/m ²)	-0,72	0,255089
	10	Tipo de eletrodo	-	-
		Tempo (min)	-	-
		Densidade de corrente (A/m ²)	-	-
25	3	Tipo de eletrodo	-2,37	0,036300
		Tempo (min)	1,0	0,085427
		Densidade de corrente (A/m ²)	0,43	0,193665
	10	Tipo de eletrodo	-2,47	0,027040
		Tempo (min)	0,13	0,444781
		Densidade de corrente (A/m ²)	0,69	0,096139
35	3	Tipo de eletrodo	-0,09	0,534378
		Tempo (min)	0,32	0,186905
		Densidade de corrente (A/m ²)	0,41	0,147762
	10	Tipo de eletrodo	-	0,067512
		Tempo (min)	-	0,123630
		Densidade de corrente (A/m ²)	-	0,151349

Fonte: Autor (2021).