

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Urutaí
Programa de Pós-Graduação em Conservação de
Recursos Naturais do Cerrado

TRATAMENTO ALTERNATIVO DE EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS

JOCELINE MARIA DA COSTA SOARES

Orientadora: Prof. Dra. Débora Astoni Moreira

Coorientador: Prof. Dr. José Antônio Rodrigues de Souza

Urutaí, Junho de 2018





Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano

Reitor

Prof. Dr. Vicente Pereira Almeida

Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação e Inovação

Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva

Campus Urutaí

Diretor Geral

Prof. Dr. Gilson Dourado da Silva

Diretor de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação

Prof. Dr. André Luís da Silva Castro

Programa de Pós-Graduação em Conservação de Recursos Naturais do Cerrado

Coordenador

Prof. Dr. Ivandilson Pessoa Pinto de Menezes

Urutaí, Junho de 2018

JOCELINE MARIA DA COSTA SOARES

**TRATAMENTO ALTERNATIVO DE EFLUENTES DE
UMA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS**

Orientadora

Prof. Dra. Débora Astoni Moreira

Coorientador

Prof. Dr. José Antônio Rodrigues de Souza

Dissertação apresentada ao Instituto Federal Goiano –
Campus Urutaí, como parte das exigências do Programa
de Pós-Graduação em Conservação de Recursos Naturais
do Cerrado para obtenção do título de Mestre.

Urutaí - GO
2018

Os direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

ISSN XX-XXX-XXX

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIB/IF Goiano

S676d Soares, Joceline Maria da Costa.

Desenvolvimento e estudo de viabilidade de um sistema alternativo para tratamento de efluentes de uma indústria de laticínio [Manuscrito] / Joceline Maria da Costa Soares. -- Urutaí, GO: IF Goiano, 2018. 44 fls.

Orientadora: Dra. Débora Astoni Moreira.

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Conservação de Recursos Naturais do Cerrado) – Instituto Federal Goiano - Campus Urutaí, 2018.

1. Aplicabilidade. 2. Remoção da Carga Orgânica. 3. Processos Oxidativos. I. Título.

CDU 628

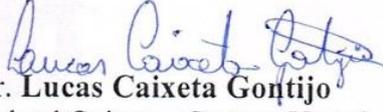


FICHA DE APROVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

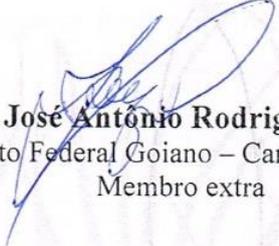
Título da dissertação:	<i>Tratamento Alternativo de Efluentes de uma Indústria de Laticínios</i>
Orientadora:	Prof. ^a Dra. Débora Astoni Moreira
Coorientador:	Prof. Dr. José Antônio Rodrigues de Souza
Autora:	Joceline Maria da Costa Soares

Dissertação de Mestrado **APROVADA** em **29 de junho de 2018**, como parte das exigências para obtenção do Título de **MESTRA EM CONSERVAÇÃO DE RECURSOS NATURAIS DO CERRADO**, pela Banca Examinadora especificada a seguir:


Prof.^a Dra. **Débora Astoni Moreira**
Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí
Presidente


Prof. Dr. **Lucas Caixeta Gontijo**
Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí
Membro titular


Prof. Dr. **Antover Panazzolo Sarmiento**
Universidade Federal de Goiás – Campus Catalão
Membro titular


Prof. Dr. **José Antônio Rodrigues de Souza**
Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí
Membro extra

*“Nunca desista daquilo que você quer,
mesmo que a vida lhe ponha obstáculos, se
tropeçares, levante isso não há de ser nada e
lembre-se, o caminho a gente faz
caminhando”.*

(Lude Mendes)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus, nosso Pai, por me proporcionar ânimo, força, coragem, determinação e acima de tudo fé. Uma vez que, nunca imaginei que poderia crescer tanto em tão pouco tempo. As experiências e vivências que tive ao longo desse mestrado, me capacitaram para a vida acadêmica, mas também para a “vida real”, o que me proporcionou o meu crescimento profissional juntamente com o meu crescimento pessoal. A Deus, só tenho que agradecer-lo por tamanha alegria, por proporcionar a realização de um sonho, e de tal desafio em minha vida. Com ele, meus momentos difíceis foram transformados em confiança, os de desespero, convertidos em fé, e hoje posso dizer que tudo que aconteceu, foi da melhor forma possível para meu aprendizado. Obrigada meu Pai, por me conduzir tão brilhantemente meu caminho.

Em especial, não poderia deixar de agradecer as pessoas que são o esteio da minha vida, meus pais, Madalena e Osires. Guerreiros que me ensinaram a batalhar, a sonhar e a aspirar ser uma pessoa melhor. Graças ao esforço e dedicação deles, pude investir na minha formação profissional. Nunca me cobraram nada, somente que eu fizesse o meu melhor, com dedicação, esforço, muito amor e com um sorriso no rosto. Obrigada sempre pelo apoio, incentivo, e por seu amor incondicional. Só tenho a agradecer-los sempre por permitirem trilhar meu próprio caminho.

A minha jornada também não seria possível sem o apoio do meu namorado Túlio César, obrigada pelo seu companheirismo, amor e paciência, e por compreender as ausências e renúncias. Você foi fundamental para a conclusão desse trabalho.

Aos meus irmãos, Caroline e Rafael, que tanto me apoiaram e incentivaram, o meu muito obrigada. Não há palavras para agradecer-los, pela paciência e compreensão. E não poderia deixar de agradecer minha irmã Caroline, pelas sessões de terapias gratuitas e das inúmeras tentativas em me acalmar, me fizeram perceber que jamais devemos desistir de nossos sonhos. E obrigada ao meu cunhado Rafael, a minha cunhada Juliana e minha sobrinha Vitória, por estarem sempre presentes, propiciando-me momentos felizes e animadores.

A minha orientadora professora Dra. Débora Astoni Moreira, por me receber sob sua orientação, por apontar o caminho quando tudo parece perdido, e por me conduzir sabiamente para a conclusão deste trabalho. Obrigada pelas conversas agradáveis, a acessibilidade, por todo apoio, confiança, paciência, compreensão e por acreditar em minha capacidade. Ao meu coorientador Dr. José Antônio Rodrigues de Souza, o meu muito obrigada, por me receber sob

sua coorientação, por permite o uso do Laboratório de Pesquisa e Análises Químicas (LPAQ), pela paciência e confiança.

Nos bastidores ainda tenho muito a agradecer. Tive o prazer de conviver e conhecer pessoas incríveis no meu local de trabalho. A Cíntia Viegas Silva, Liana Moreira Vidigal e a Simone Lúcia da Silva Felipe, são a vocês que também dedico este trabalho, por estarem sempre ao meu lado, incentivando, ajudando, apoiando e também por proporcionar os melhores almoços da minha vida. Por melhorar cada vez mais meu trabalho, por me acalmarem nas horas em que um “cisco insistia ficar em meus olhos”, por me mostrarem caminhos que ainda não havia percebido. Por se tornarem pessoas especiais para mim, e hoje serem minhas amigas.

Esse trabalho também é dedicado a Denise Braga Gomes de Faria, uma amizade que iniciou no mestrado, e que desejo que dure para sempre. Obrigada por me acalmar, por ser amiga e parceira.

Aos amigos e colegas do curso de Licenciatura em Química, por serem tão bons pra mim. Por compreenderem minhas ausências, e que não pouparam esforços em me ajudar e me ensinar. Obrigada por proporcionarem muitos sorrisos e alegrias para enfrentar os momentos difíceis.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Conservação de Recursos Naturais do Cerrado e do curso de Licenciatura em Química, do IF Goiano – Campus Urutaí, pela amizade, motivação e suas contribuições.

Agradecer é muito bom. Gosto de reconhecer que não sou “sozinha no mundo” que meus amigos, meu namorado, minha família e Deus são a base de tudo que faço. Sou grata a todos que participaram de forma direta ou indireta dessa pesquisa. Quero, ainda nessa vida, retribuir todo carinho, amor e dedicação que recebi.

A todos vocês que tem cadeira cativa no meu coração: **MUITO OBRIGADA.**

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
RESUMO	11
ABSTRACT	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. MATERIAL E MÉTODOS	16
2.1. Amostragem.....	17
2.2. Procedimento Experimental.....	18
2.2.1. Caracterização Analítica do Efluente da Indústria de Laticínios	18
2.2.2. Sistema de Tratamento de Efluente.....	18
2.2.2.1. Processo Fenton	19
2.2.2.1.1. Determinação da Dosagem de Peróxido de Hidrogênio e Sulfato de Ferro (II)	19
2.2.2.1.2. Determinação para Adição dos Reagentes.....	20
2.2.2.1.3. Estudo da Influência da Dosagem de Peróxido de Hidrogênio, Sulfato de Ferro (II) e pH.....	21
2.2.2.2. Processo Foto-Fenton	22
2.2.2.3. Processo Foto sem Adição de Reagentes.....	23
2.2.2.4. Lodo do POA's	24
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
3.1. Caracterização Físico-Química do Efluente da Indústria de Laticínios	24
3.2. Sistema de Tratamento de Efluente.....	26
3.2.1. Processo Fenton	26
3.2.1.1. Determinação da Dosagem de Peróxido de Hidrogênio e Sulfato de Ferro (II)	26
3.2.1.2. Determinação para Adição dos Reagentes.....	29
3.2.1.3. Estudo da Influência da Dosagem de Peróxido de Hidrogênio, Sulfato de Ferro (II) e pH.....	30
3.2.2. Processo Foto-Fenton	34
3.2.3. Processo Foto sem Adição de Reagentes	36
3.2.4. Lodo dos POA's	37
4. CONCLUSÃO	38
5. REFERÊNCIAS	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Local de coleta da amostra do resíduo (Bruto).....	17
Figura 2. Local de coleta da amostra de resíduo (Tratamento Químico).....	18
Figura 3. Sistema de irradiação do Processo Foto-Fenton.....	23
Figura 4. Resultados da avaliação das concentrações de FeSO_4 e H_2O_2 na amostra de efluente bruto decorrente do processo Fenton	28
Figura 5. Resultados da avaliação das concentrações de FeSO_4 e H_2O_2 nas amostras do efluente tratado decorrente do processo Fenton	28
Figura 6. Resultados das análises da variável tempo com relação a melhor dosagem	30
Figura 7. Resultados da matriz experimental das amostras do (Bruto) de cada experimento.	32
Figura 8. Resultados da matriz experimental das amostras do efluente Tratado de cada experimento	33
Figura 9. Resultados da comparação dos processos Foto-Fenton e Fenton.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dosagens de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e H_2O_2	20
Tabela 2. Adição de Reagentes de uma só vez e Fracionado	21
Tabela 3. Valores das variáveis para o planejamento fatorial 2^3	21
Tabela 4. Matriz do planejamento fatorial 2^3	22
Tabela 5. Caracterização físico-química das amostras dos efluentes utilizados nos ensaios experimentais.....	25
Tabela 6. Valores médios da redução percentual de DQO e Turbidez em função das diferentes concentrações de FeSO_4 e H_2O_2	27
Tabela 7. Resultados redução percentual de DQO e turbidez na avaliação da melhor dosagem em relação tempo da adição dos reagentes.....	29
Tabela 8. Resultados obtidos da DQO e Turbidez ao final de cada experimento para o efluente bruto.....	31
Tabela 9. Resultados obtidos DQO e Turbidez ao final de cada experimento para o efluente tratado.....	32
Tabela 10. Comparação dos processos Foto-Fenton e Fenton nos diferentes efluentes utilizados	34
Tabela 11. Comparação do processo Foto sem Adição de Reagentes realizadas com os diferentes efluentes estudados	36
Tabela 12. Resultados da caracterização físico-química do lodo gerado no POA's e no processo foto sem a adição de reagentes.....	37

RESUMO

As indústrias de laticínios tendem a causar grande poluição ao meio ambiente ao lançar o efluente em corpos d'água sem o tratamento adequado, reduzindo assim, drasticamente a concentração de oxigênio dissolvido, colocando em risco todo o ecossistema aquático. No contexto atual de escassez de água mundial, buscam-se soluções para minimização desse problema. Diante disso, o presente trabalho objetivou desenvolver uma alternativa de tratamento de efluentes de uma indústria de laticínio, por meio da redução da carga orgânica do efluente, utilizando os Processos Oxidativos Avançados (POA's), como processo Fenton, Foto-Fenton e processo Foto sem Adição de Reagentes. Assim, foram realizados ensaios de bancada com um efluente de uma empresa parceira, para verificação da eficiência na remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Turbidez. Para a caracterização Físico-Química do efluente Bruto e tratado, realizando as análises: DQO, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅, 20°C), Nitrogênio Total, Fósforo Total, Turbidez, Sólidos Totais, Sólidos em Suspensão Totais, Sólidos Sedimentáveis, Condutividade Elétrica e Potencial Hidrogeniônico. Com isso, o efluente in natura e o efluente tratado da indústria apresentaram valores de DBO₅, 20 °C, DQO, turbidez, sólidos sedimentáveis, sólidos em suspensão totais e sólidos totais superiores aos permitidos para descarte direto em corpos de água. A partir da caracterização dos efluentes, foi feito no processo Fenton um estudo de diferentes concentrações de FeSO₄ e H₂O₂, e o tempo de reação. Após a determinação da melhor dosagem de FeSO₄, H₂O₂ e o melhor tempo de adição dos reagentes, por meio do planejamento experimental no tratamento de efluentes de laticínios, determinou-se as melhores condições entre as variáveis estudadas para as etapas de tratamentos com POA, tendo como fator de resposta a redução da DQO e Turbidez. Com o experimento que obteve maior eficiência no processo, realizou-se o mesmo procedimento com o processo Foto-Fenton, e após, aplicou-se o processo Foto sem Adição de Reagentes. Em seguida, realizou-se a caracterização do lodo dos processos. Diante disso, a melhor eficiência de remoção da carga orgânica foi obtida quando se utilizou 6,95 gramas de FeSO₄ e 20,15 mL de H₂O₂ adicionados em uma única vez, no início do processo de tratamento, em pH 3. O processo Foto-Fenton apresentou maior eficiência de remoção da carga orgânica que o processo Fenton, no efluente in natura. Os processos Fenton e Foto-Fenton geram grandes quantidades de lodo, embora apresentem elevada eficiência de tratamento da carga orgânica. Em todos os resultados obtidos, percebe-se redução DQO dentro dos limites para lançamento em corpos hídricos, exceto para o Foto-Fenton para efluente tratado e no experimento utilizando somente a lâmpada UV. Dessa forma, o processo Fenton apresentou-se como uma alternativa de elevada eficiência na remoção da carga orgânica.

Palavras-chave: Aplicabilidade, Remoção da carga orgânica, Processos Oxidativos.

ABSTRACT

The dairy industries tend to cause great pollution to the environment by releasing the effluent into bodies of water without proper treatment, thus drastically reducing the concentration of dissolved oxygen, putting at risk the whole aquatic ecosystem. In the current context of global water scarcity, solutions are sought to minimize this problem. Therefore, the present work aimed to develop an alternative treatment of effluents from a dairy industry by reducing the organic load of the effluent using the Advanced Oxidative Processes (POA's), such as Fenton process, Photo-Fenton process and Photo without Addition of Reagents. Thus, bench tests with an effluent from a partner company were carried out to verify the efficiency in the removal of Chemical Oxygen Demand (COD) and Turbidity. (BOD_5 , 20°C), Total Nitrogen, Total Phosphorus, Turbidity, Total Solids, Total Suspended Solids, Sedimentable Solids, Electrical Conductivity and Physical and Chemical Characterization of the Raw and Treated effluent, performing the analyzes: COD, Biochemical Oxygen Demand Hydrogen potential. In this way, the raw effluent and treated effluent from the industry presented values of BOD_5 , 20 °C, COD, turbidity, settling solids, total suspended solids and total solids higher than allowed for direct Water. From the characterization of the effluents, a study of different concentrations of $FeSO_4$ and H_2O_2 , and the reaction time, were made in the Fenton process. After determining the best dosage of $FeSO_4$, H_2O_2 and the best time of addition of the reagents, through the experimental design in the treatment of dairy effluents, the best conditions among the variables studied for the POA treatment stages were determined, as a response factor to COD reduction and Turbidity. With the experiment that obtained the highest efficiency in the process, the same procedure was performed with the Photo-Fenton process, and afterwards, the Photo without Reagents Addition process was applied. Then, the sludge characterization of the processes was carried out. Therefore, the best organic charge removal efficiency was obtained when 6.95 grams of $FeSO_4$ and 20.15 mL of H_2O_2 were added at a single time at the beginning of the treatment process at pH 3. The Photo-Fenton presented higher efficiency of removal of the organic load than the Fenton process, in the effluent in natura. The Fenton and Photo-Fenton processes generate large amounts of sludge, although they present high treatment efficiency of the organic load. In all the results obtained, COD reduction is observed within the limits for water bodies, except for the Photo-Fenton for treated effluent and in the experiment using only the UV lamp. Thus, the Fenton process presented as an alternative of high efficiency in the removal of the organic load.

Keywords: Applicability, Removal of organic load, Oxidative processes.

1. INTRODUÇÃO

O espaço geográfico ocupado pelo bioma Cerrado desempenha papel fundamental no processo de distribuição dos recursos hídricos pelo país, constituindo-se o local de origem das grandes regiões hidrográficas brasileiras (LIMA, 2011). Porém, de acordo com Lima (2011), atualmente a quantidade de água potável disponível se encontra cada vez mais escassa na natureza, fruto de explorações excessivas associadas à disposição inadequada dos rejeitos das diversas atividades humanas.

Deste modo, o desenvolvimento de uma política de gerenciamento dos recursos hídricos tem se tornado inevitável. Em que a disposição dos resíduos no ambiente, por meio de emissões de matéria e de energia lançados na atmosfera, nas águas ou no solo, deve ocorrer após passarem por tratamentos e estarem de acordo com os padrões previstos na legislação ambiental (AQUARONI; BORZANI & LIMA, 1990). Quanto à legislação, tem-se à Resolução 430/2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementam e alteram, parcialmente, e a Resolução 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

Conforme Araújo et al. (2016), o descarte inadequado de efluentes industriais, gera uma preocupação pública, além de sanções legais, de acordo com a legislação vigente, o que configura-se um desafio para a comunidade científica na resolução de problemas ambientais. Como também, por se tratarem de resíduos bastante diversificados na sua composição química, contendo poluentes tóxicos (FLORÊNCIO & MALPASS, 2014; SOUZA & PERALTA-ZAMORA, 2005).

Nesse contexto, as indústrias de laticínios são umas das principais geradoras de efluentes, devido ao uso, de um grande volume de água, necessário para produção de produtos lácteos, o que faz com que haja um tratamento prévio de seus despejos líquidos antes do lançamento para disposição final em cursos d'água (BEGNINI & RIBEIRO, 2014). Muitas dessas indústrias são de micro e pequeno porte, cuja capacidade financeira, são forçadas a relegar as questões ambientais a um segundo plano (VON SPERLING, 2005).

Todavia, devido às exigências crescentes da legislação ambiental, associada a maior conscientização da população, que vem buscando consumir cada vez mais, produtos e serviços que gerem menor impacto no meio ambiente, têm forçado uma mudança mais rápida

de atitude por parte dos empresários, no sentido de controlar a poluição (MACHADO; FREIRE & SILVA, 2000).

Os efluentes das indústrias de laticínio apresentam elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como consequência da grande quantidade de lipídios, carboidratos e proteínas, que conferem ao sistema uma alta carga orgânica (BEGNINI & RIBEIRO, 2014; PEREIRA & FERNANDES, 2018). Quando lançados em corpos d'água sem tratamento adequado, reduzem drasticamente a concentração de oxigênio dissolvido e colocam em risco todo o ecossistema aquático (VILLA; SILVA & NOGUEIRA, 2007). De acordo com Von Sperling (2005) e Melo et al. (2009), geralmente, os processos utilizados para a redução da matéria orgânica nos efluentes líquidos dos laticínios são do tipo biológicos, que muitas vezes requerem grandes áreas ou, na falta deste, equipamentos com elevado custo.

Deste modo, faz-se necessário o estudo de um sistema que viabilize o tratamento de efluentes das indústrias de laticínios, para que os resíduos possam ser descartados de forma adequada conforme a legislação ambiental, minimizando a poluição dos cursos d'água, e consequentemente, sem gerar danos ao meio ambiente. Nas últimas décadas, uma das alternativas de tratamento são os Processos Oxidativos Avançados (POA's), vêm se destacando como uma poderosa ferramenta aplicada na degradação de poluentes, por se tratar de métodos eficientes que reduzem os impactos ambientais (ARAÚJO et al., 2016; PEREIRA & FERNANDES, 2018). Além disso, tem-se uma vasta fonte de estudos e aplicação destes processos no tratamento de efluentes contaminados com compostos orgânicos tóxicos (LOPEZ et al., 2004; PHILIPPOPOULOS & POULOPOULOS, 2003; SALAH et al., 2004).

Os processos de tratamento utilizando os POA's baseiam-se na geração de radicais hidroxilas ($\bullet\text{OH}$) (BRITO & SILVA, 2012; FIORENZE; SANTOS & SCHMACHTENBERG, 2014; ARAÚJO et al., 2016). Conforme relatado por Pera-Titus et al. (2004) são capazes de reagir com praticamente todas as classes de compostos orgânicos, sendo a principal vantagem, a completa mineralização (destruição) dos contaminantes, resultando em produtos mais biodegradáveis.

Os principais POA's são químicos, fotoquímicos, sonoquímicos e eletroquímicos, e muitas das vezes, a combinação desses processos, configura-se uma maior eficiência (ARAÚJO et al., 2016). Diante disso, segundo Araújo et al. (2016), dentre os POA's químicos, destaca-se o processo Fenton, que envolve reações do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) dissolvido na presença de íons de ferro II, a fim de gerar fortemente oxidantes para

degradar ou destruir uma variedade de poluentes orgânicos. Ou seja, o processo Fenton utiliza os íons ferrosos (Fe^{2+}) como catalisadores, em meio ácido, no intuito de promover a decomposição de H_2O_2 e, deste modo, gerar radicais hidroxilas ($\text{HO}\bullet$), conforme apresenta a equação 1 (BRILLAS; SIREN & OTURAN, 2009; BAIRD, 2002).



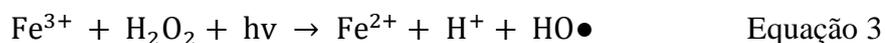
Na reação de Fenton o processo é realizado por quatro fases, sendo o ajuste de pH, reação de oxidação, neutralização de coagulação e precipitação (SILVA & DIAS, 2017). Com base nesse processo, obtém-se inúmeras vantagens na utilização de tratamento de águas residuais, destacando-se a operação simples e flexível, facilidade de manuseio, uso de produtos químicos de baixo custo e ausência de entrada de energia (BAUTISTA et al., 2008).

Os POA's fotoquímicos consistem em tecnologias simples e mais eficientes que os POA's químicos, uma vez que conseguem desinfetar águas e destruir uma alta porcentagem das poluentes (ARAÚJO et al., 2016). Já que, a associação da irradiação UV com os agentes oxidantes fortes, como, peróxido de hidrogênio (H_2O_2), ozônio (O_3) e catálise com dióxido de titânio (TiO_2), promove as reações: foto-decomposição (baseada na irradiação UV, excitação e degradação de moléculas de poluentes), oxidação por ação direta de H_2O_2 e O_3 , e oxidação por fotocatalise com TiO_2 , levando à formação de radicais hidroxila (ARAÚJO et al., 2016).

Deste modo, o processo foto-fenton ocorre naturalmente, em que (H_2O_2) pode ser fotolisado por irradiação UV em comprimentos de onda de 200 a 300 nm (representado como $h\nu$), ocasionando a quebra da ligação O-O da molécula de H_2O_2 , gerando radicais hidroxila ($\text{HO}\bullet$), conforme apresenta a Equação 2 (HERNANDEZ et al., 2002).



Desta maneira, segundo Araújo et al. (2016) o processo foto-Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{UV}$) aumenta a formação de radicais hidroxila ($\text{HO}\bullet$), em que trata-se do processo Fenton assistido por irradiação UV, que induz a redução catalítica em soluções aquosas de H_2O_2 e de Fe^{3+} (íons férricos) a Fe^{2+} (íons ferrosos) (Equação 3).



Diante disso, os POA's configuram-se tecnologias eficientes na degradação de poluentes presentes em efluentes, tornado uma área de extensa investigação (ARAÚJO et al., 2016). Assim, torna-se interessante confrontar os fundamentos obtidos no âmbito laboratorial com a efetiva aplicação desses processos nas indústrias.

A partir disso, o presente estudo pretendeu tratar o efluente gerado de uma indústria de Laticínios, adequando aos padrões de lançamento exigidos pelos órgãos ambientais e verificar a eficiência do sistema desenvolvido. Deste modo, realizou o tratamento de efluente de laticínios, adotando processo Fenton/ Foto Fenton, e posteriormente realizou um estudo da eficiência deste sistema. O que consequentemente contribui para a preservação dos corpos d'água, ao mesmo tempo, proporcionando rendimentos econômicos satisfatórios para empresas neste setor, apresentando-se como uma tecnologia útil e sustentável para a disposição final de efluentes produzidos em indústrias laticínias.

E ainda, por se tratar de um sistema alternativo para tratamento de efluentes e da necessidade que a empresa parceira se adeque a legislação ambiental quanto à disposição adequada de seus resíduos, pode-se verificar a preservação ambiental do POA's sugeridos. Associado a isso, a possibilidade de utilizar o processo de tratamento sugerido como propaganda para a empresa, tornando-se referência em tratamento e preocupação ambiental, garantirá que demais empresas da região possam fazer visitas e replicar o modelo em suas empresas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Pesquisa e Análises Químicas (LPAQ), e demais laboratórios do Prédio da Química do Instituto Federal Goiano Urutaí (IF Goiano) – Campus Urutaí, em Urutaí - GO. Sendo estabelecida uma parceria com uma empresa do município de Orizona, situada na porção Sudeste do Estado de Goiás, o qual forneceu o efluente para a realização do estudo.

Para a definição do efluente a ser tratado neste estudo, preliminarmente foi necessária uma visita à empresa em foco, para conhecimento de todo processo de beneficiamento do leite e seus diferentes tratamentos efetuados na geração de resíduos. Nesta visita foi detectada a existência de dois processos de tratamentos realizados pela empresa, sendo aplicados

processos físico-químicos (floculação, flotação e a decantação) e biológicos (lagoas aeróbias facultativas).

Deste modo, o estudo verificou dois pontos geradores de descartes potencialmente poluidores, sendo oriundos do resíduo líquido bruto da empresa e outro do fim da etapa do processo químico. A partir disso, os resíduos líquidos adquiridos para o estudo, passaram a ser chamados de Efluente Bruto (que é o resíduo líquido *in natura* da empresa) e Efluente Tratado (fim da etapa do processo químico), conforme os pontos de coletas das Figuras 1 e 2.

2.1. Amostragem

Recolheu-se o efluente bruto, proveniente da linha da produção da empresa e o efluente após o tratamento químico (adição de sulfato de alumínio e polímero), em 8 reservatórios plásticos de 5 litros, conforme as Figuras 1 e 2. As amostras foram acondicionadas a temperatura de 3 °C, na geladeira do LPAQ/IF Goiano.

Figura 1. Local de coleta da amostra do resíduo (Bruto)



Fonte: A autora

Figura 2. Local de coleta da amostra de resíduo (Tratamento Químico)



Fonte: A autora

Foram realizadas cinco coletas para cada etapa do estudo, em datas distintas, do resíduo líquido bruto e tratado da indústria, sendo todas as análises realizadas em triplicata. Conforme a empresa, o efluente é oriundo do processo de lavagem com água e lavagem com sabão dos tanques de produção, feitas na caixa de descarga, de forma homogênea, possibilitando a existência de uma amostra única.

2.2. Procedimento Experimental

2.2.1. Caracterização Analítica do Efluente da Indústria de Laticínios

A caracterização do efluente da indústria de laticínios foi realizada por meio das análises físico-químicas de sólidos totais, sólidos suspensos totais, sólidos sedimentáveis, turbidez, condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico, nitrogênio total, fósforo total, demanda química de oxigênio e demanda bioquímica de oxigênio, conforme metodologias recomendadas pela American Public Health Association (APHA, 2012).

2.2.2. Sistema de Tratamento de Efluente

Após a caracterização do efluente bruto e tratado pela empresa parceira, iniciou o desenvolvimento de um sistema de tratamento de efluente de uma indústria de laticínio, utilizando processos de degradação de poluentes, através de processos químicos e fotoquímicos. Para isso, adotaram-se os Processos Oxidativos Avançados como: processo

Fenton (químico), e em seguida o processo Foto-Fenton (fotoquímico), e por último um processo Foto sem adição de reagentes.

Contudo, para o desenvolvimento deste sistema, foram necessários estudos iniciais, para determinação da melhor dose de peróxido de hidrogênio, sulfato de ferro (II) e a adição de reagentes de uma só vez ou fracionados.

2.2.2.1. Processo Fenton

O Processo Fenton foi realizado em escala de bancada, foram tratados 1 L de amostra do efluente bruto e tratado do laticínio. A reação foi iniciada com a adição de sulfato de ferro (II) (FeSO_4) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Com isso, utilizou o peróxido de hidrogênio (H_2O_2 , 35%) usado como agente oxidante. O sulfato de ferro (II) hepta-hidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) usado como fonte de íons Fe^{2+} . O ácido clorídrico (HCl), em solução aquosa ($1,0 \text{ mol L}^{-1}$) foi utilizado para o ajuste do pH inicial da solução. O hidróxido de sódio (NaOH) foi usado como agente inibidor do processo de degradação, em solução aquosa ($1,0 \text{ mol L}^{-1}$), com a finalidade de precipitar os íons de ferro e, conseqüentemente, encerrar a reação.

O processo Fenton constituiu em realizar o tratamento de água residuária, sendo amostra homogeneizada, e a partir disso, ajustou-se o pH para o valor em meio ácido (2,0), usando ácido clorídrico $1,0 \text{ mol L}^{-1}$. Posteriormente, adicionou-se uma determinada dosagem de FeSO_4 e H_2O_2 , agitando amostra por um período de um minuto. Após a agitação, amostra permanecia em repouso em um determinado tempo, e em seguida, ajustou-se o pH para o meio neutro, usando hidróxido de sódio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$. Ao fim do processo, a amostra permaneceu em repouso por 30 minutos, conforme o estudo de Lange et al. (2006), em que apresenta esse tempo como o de melhor eficiência, além de menor custo. E assim, retirou-se uma alíquota para determinação das análises físico-químicas, conforme descrito anteriormente.

2.2.2.1.1. Determinação da Dosagem de Peróxido de Hidrogênio e Sulfato de Ferro (II)

Iniciou-se a realização de testes de dosagens de FeSO_4 e H_2O_2 , no intuito de verificar os efeitos das variáveis de concentração, e ainda verificar a dosagem que consegue reduzir

maior quantidade de matéria orgânica. Com isso, realizou-se o teste com três dosagens tanto para o FeSO_4 , quanto para o H_2O_2 , conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Dosagens de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e H_2O_2

Amostras		$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	H_2O_2 (35%)
Bruto	Tratado		
A	D	0,66 gramas	1,98 mL
B	E	6,95 gramas	20,15 mL
C	F	3,47 gramas	10,03 mL

Fonte: A autora

As concentrações de sulfato de ferro (II) foram estabelecidas com base em estudos já realizados de acordo com Kempka et al. (2012), e a concentração de peróxido de hidrogênio foi determinada de acordo com a dosagem de sulfato ferroso.

O ensaio para avaliar a melhor dosagem no tratamento do Fenton foi realizado em um equipamento Jar-Test marca Policontrol, modelo Floc Control II com capacidade para três testes simultâneos (três cubas). No ensaio foi utilizado o programa 2 do equipamento, em que a velocidade de mistura rápida empregada é 100 rpm (Rotações por minuto), o tempo de mistura rápida é 1 minuto e o tempo de decantação é de 3 horas. Em cada cuba do Jar-Test foi adicionado 1 L do efluente, e no ensaio procedeu-se com a temperatura ambiente e com ajuste do pH do efluente para o valor igual a 2,0, usando ácido clorídrico $1,0 \text{ mol L}^{-1}$. Em seguida, adicionou-se a dosagem de FeSO_4 e H_2O_2 diferentes e separadamente, conforme cada ensaio (cuba). Após o repouso de 3 horas, ajustou-se o pH para o meio neutro, usando hidróxido de sódio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$. Depois, deixou-se amostra em repouso por cerca de 30 minutos, e por fim, coletou-se uma alíquota com cerca de 50 mL do sobrenadante para a realização das análises de DQO e Turbidez.

2.2.2.1.2. Determinação para Adição dos Reagentes

Após a obtenção do resultado da melhor dosagem de FeSO_4 e H_2O_2 , ou seja, a dosagem com valores maiores de redução de DQO e Turbidez, realizou-se o experimento para verificar se o peróxido de hidrogênio e o sulfato de ferro (II) deveriam ser adicionados em frações ou todo no início do processo (Tabela 2).

Tabela 2. Adição de Reagentes de uma só vez e Fracionado

Amostras		Testes	Tempo	FeSO ₄ .7H ₂ O	H ₂ O ₂ (35%)
Bruto	Tratado				
	A	1° Teste	3 horas	6,95 gramas	20,15 mL
	B	2° Teste	1,5 horas	3,47 gramas	10,07 mL

Fonte: A autora

O procedimento experimental foi o mesmo realizado no item 2.2.2.1.1, apenas com uma diferença, no primeiro teste, adicionou-se toda a quantidade dos reagentes no início do processo. Já o segundo teste, adicionou-se os reagentes fracionados, metade no início, e depois de 1(uma) hora e 30 (trinta) minutos, metade do tempo do processo, adicionou-se o restante da quantidade de reagentes.

Após o período de repouso, coletou-se uma alíquota com cerca de 50 mL do sobrenadante para a realização das análises de DQO e Turbidez.

2.2.2.1.3. Estudo da Influência da Dosagem de Peróxido de Hidrogênio, Sulfato de Ferro (II) e pH

Após a obtenção do resultado dos testes de tempo de aplicação dessa dosagem, foram investigados os efeitos das variáveis concentração de FeSO₄.7H₂O, concentração de H₂O₂ e pH, sobre a oxidação da matéria orgânica presente no efluente por meio de um planejamento fatorial completo 2³. O objetivo principal foi determinar a influência de cada uma das variáveis citadas anteriormente, e do efeito combinado das mesmas na redução dos valores de DQO e Turbidez obtida após o tratamento. Assim, na Tabela 3 estão apresentados os valores das variáveis para o planejamento fatorial 2³, e na Tabela 4 está apresentada a matriz do planejamento experimental.

Tabela 3. Valores das variáveis para o planejamento fatorial 2³

Variáveis	Níveis	
	Inferior (-)	Superior (+)
Massa de FeSO ₄ .7H ₂ O (g)	0,66	6,95
Volume de H ₂ O ₂ (mL)	1,98	20,15
pH	2	3

Fonte: A autora

Tabela 4. Matriz do planejamento fatorial 2^3

Ensaio	Concentrações de FeSO ₄ (mg)	Concentrações de H ₂ O ₂ (mL)	pH
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Fonte: A autora

O procedimento experimental do planejamento fatorial foi o mesmo que utilizou com os testes anteriores. Entretanto, para o planejamento fatorial não utilizou o equipamento Jar-Test, uma vez que possui capacidade apenas para três testes simultâneos (três cubas). Como o estudo pretendeu realizar o fatorial 2^3 , ou seja, 8 testes (ensaio) simultâneos. Adotou-se em vez de cubas, 8 béqueres de 2 L cada, sendo utilizado para agitação o aparelho agitador magnético com aquecimento SCIOLOGEX, do modelo MS-H-Pro⁺.

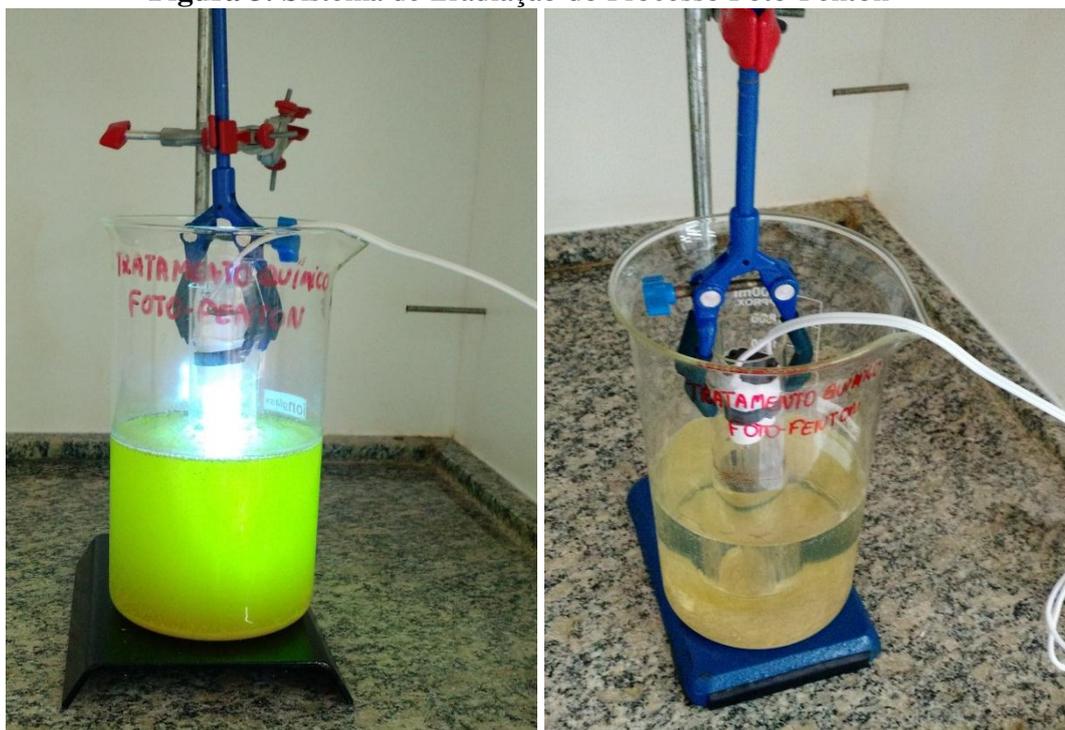
Entretanto, embora tenha-se adotado inicialmente o aparelho Jar-Test, para os testes do item 2.2.2.1.1. e 2.2.2.1.2., foram realizados posteriormente ao planejamento fatorial, testes adotando o mesmo procedimento do planejamento, a fim de confirmar os dados obtidos quando adotado o aparelho e sanar qualquer erro experimental.

2.2.2.2. Processo Foto-Fenton

Após a obtenção do resultado do planejamento fatorial com o processo Fenton, iniciou-se a aplicação do processo Foto-Fenton. Esse processo possui o mesmo procedimento experimental do Fenton, mas apresenta um diferencial, que trata-se da presença da lâmpada ultravioleta (UV) durante o processo.

O sistema de irradiação foi composto por uma lâmpada de vapor de mercúrio de baixa pressão, 9 W, modelo CUH13L (Creator), com 11,5 cm de comprimento e 2,5 cm de diâmetro, que fica encapsulada por um tubo de quartzo de 23 mm de diâmetro e 140 mm de altura (FIGURA 3). Conforme descrito por Martins et al. (2011), a lâmpada permanece imersa no efluente, protegida pelo tubo de quartzo, para evitar propagação de radiação ultravioleta e proteger a lâmpada do líquido.

Figura 3. Sistema de irradiação do Processo Foto-Fenton



Fonte: A autora

O experimento foi realizado dentro de uma capela, de forma que pode-se tampar, para evitar a propagação da radiação. Além disso, a homogeneidade da solução foi mantida por meio de um agitador magnético.

2.2.2.3. Processo Foto sem Adição de Reagentes

Este processo trata-se de um método oxidativo, em que adotou-se a lâmpada ultravioleta (UV), embora não acrescentou os reagentes FeSO_4 e H_2O_2 , ou seja, trata-se do mesmo procedimento do processo Fenton, em que agitou-se a amostra por um período de um minuto, depois procede-se o ajuste do pH para o valor em meio ácido (3,0), usando ácido clorídrico $1,0 \text{ mol L}^{-1}$. Posteriormente, deixou-se em repouso por um período de 3 horas, com

a lâmpada (UV) imersa no efluente. Após o repouso, ajustou-se o pH para o meio neutro, usando hidróxido de sódio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$. Ao fim do processo, a amostra permaneceu em torno de 30 minutos em repouso, e assim, retirou-se uma alíquota para determinação das análises físico-químicas, conforme descrito no item 2.2.1. Diante disso, o intuito deste procedimento foi verificar a eficiência do processo sem a adição dos reagentes.

2.2.2.4. Lodo do POA's

Após o tratamento com os processos oxidativos avançados, realizou-se análises dos sólidos do lodo obtido nos processos, para verificar a remoção da carga orgânica residual. A partir disso, com a verificação da quantidade dessa remoção, determinou-se a melhor destinação destes resíduos. Com isso, o procedimento experimental adotado foi à realização das análises de sólidos sedimentáveis e sólidos totais, conforme as metodologias já mencionadas no item 2.2.1.

Com base nos resultados, avaliou-se o sistema alternativo proposto neste estudo quanto à sua eficiência, considerando as análises de DQO e Turbidez, em que a legislação estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização Físico-Química do Efluente da Indústria de Laticínios

As amostras do efluente bruto e do tratamento químico foram caracterizadas conforme os métodos analíticos descritos no item 2.2.1, estando os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Caracterização físico-química das amostras dos efluentes utilizados nos ensaios experimentais

Parâmetros	Efluentes		Padrões de Lançamento
	Bruto	Tratamento Químico	
Temperatura (°C)	29,6 ± 0,5	29,6 ± 0,5	< 40*
pH	4,7 ± 0,7	4,8 ± 0,6	5,0 – 9,0*
Condutividade Elétrica (µS cm ⁻¹)	2.025,5 ± 607,3	1.935,0 ± 580,0	-----
Sólidos totais (mg L ⁻¹)	6.333,0 ± 1.195,0	4.009,0 ± 873,4	≤ 500*
Sólidos em suspensão totais (mg L ⁻¹)	767,0 ± 456,5	402,0 ± 326,5	1 mg L ⁻¹ *
Sólidos sedimentáveis (mL L ⁻¹)	28,0 ± 9,5	35,0 ± 11,2	1 mL L ⁻¹ *
Turbidez (UNT)	1.104,0 ± 313,9	364,0 ± 195,9	≤ 100*
DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	8.437,0 ± 1.536,0	4.168,0 ± 2.076,3	Redução de 70%**
DBO ₅ , 20 °C (mg O ₂ L ⁻¹)	3.374,8 ± 952,0	1.558,8 ± 583,5	Redução de 60%*
Nitrogênio total (mg L ⁻¹)	45,5 ± 15,9	17,5 ± 5,3	-----
Fósforo total (mg L ⁻¹)	2,3 ± 0,6	0,6 ± 0,2	-----

* Resolução CONAMA nº 430/2011 e **COPAM/CERH 01/2008 (BRASIL, 2011). Fonte: A autora

Como na resolução CONAMA 430/2011 não apresenta padrão de DQO para lançamento em cursos de água e, considerando-se a grande relevância deste parâmetro por ser indicativo consumo de oxigênio obtido de maneira mais rápida, adotou-se os valores da resolução COPAM/CERH 01/2008, referenciada para o estado de Minas Gerais.

De acordo com a Tabela 5, verifica-se a exceção dos valores de temperatura, os demais parâmetros avaliados estão em desconformidade com os padrões exigidos pela legislação (CONAMA nº 430/2011 e COPAM/CERH 01/2008), uma vez que a condutividade elétrica e o fósforo total não têm padrões definidos pela legislação, portanto, indispensável o tratamento adequado para sua disposição em cursos de água.

Com base na legislação do COPAM/CERH 01/2008, observa-se que o nível de DQO, tanto no efluente bruto e no tratado, estão acima do limite permitido pela legislação. Esses valores refletem a quantidade total de componentes oxidáveis, indicando a necessidade de utilização de sistemas de tratamento mais eficientes para atendimento à legislação, já que, segundo Begnini & Ribeiro (2014), a quantidade de matéria orgânica representa consumo de

oxigênio dissolvido, bem como a matéria não biodegradável, o que promove a poluição das águas.

Da mesma forma, para os valores de DBO_5 , 20 °C verifica-se que a empresa, mesmo utilizando sistema químico de tratamento, consegue atingir um nível máximo de eficiência igual a 54,81%, inferior, portanto, aos 60% exigidos pela legislação. Além disso, o efluente tratado apresentou valor de DBO_5 , 20 °C igual a 1.558,8 mg $\text{O}_2 \text{ L}^{-1}$, indicando elevada carga orgânica.

De acordo com Azzolini, Frinhani & Fabro (2011) o parâmetro de DBO_5 , 20 °C representa de uma forma indireta, o potencial de consumo de oxigênio dissolvido, já que a presença de alto teor de matéria orgânica pode induzir ao completo esgotamento do oxigênio na água, provocando o desaparecimento de peixes e outras formas de vida aquática.

As elevadas concentrações de sólidos totais, sólidos em suspensão, sólidos sedimentáveis e turbidez estão relacionadas à lavagem de tanques de produção de base líquida, uma vez que estes produtos apresentam viscosidade elevada e grande quantidade de corantes e, durante o processo produtivo, partes desta base líquida se separa, decanta e são conduzidas nas águas de lavagem.

Além disso, os valores obtidos para o nitrogênio total também estão com concentrações elevadas. De acordo com Begnini & Ribeiro (2014), os compostos de nitrogênio ao serem despejados em grandes quantidades, tendem a aumentar a fertilidade do ambiente, possibilitando o crescimento exagerado de algas, o que promove à eutrofização do corpo d'água, sendo que este crescimento de algas em grande escala, pode trazer prejuízos ao sistema de tratamento e à qualidade de água do corpo receptor.

Assim, verifica-se que o tratamento químico do efluente realizado pela empresa não atende os padrões de lançamento em corpos de água estabelecidos segundo as normas vigentes, forçando a utilização de sistemas complementares. Dessa forma, a empresa utiliza um sistema de tratamento biológico, composto por lagoas de estabilização, a fim de atingir o nível mínimo exigido pela legislação.

3.2. Sistema de Tratamento de Efluente

3.2.1. Processo Fenton

3.2.1.1. Determinação da Dosagem de Peróxido de Hidrogênio e Sulfato de Ferro (II)

Com base nos procedimentos do processo Fenton, realizou-se os testes de dosagens de FeSO_4 e H_2O_2 , no intuito de verificar os efeitos da concentração, bem como determinar a dosagem que proporciona maior redução de matéria orgânica, acompanhando as variações nas variáveis DQO e turbidez. Na Tabela 6 estão apresentados os valores da DQO e turbidez após o processo Fenton, de acordo com a metodologia item 2.2.2.1.1.

Tabela 6. Valores médios da redução percentual de DQO e Turbidez em função das diferentes concentrações de FeSO_4 e H_2O_2

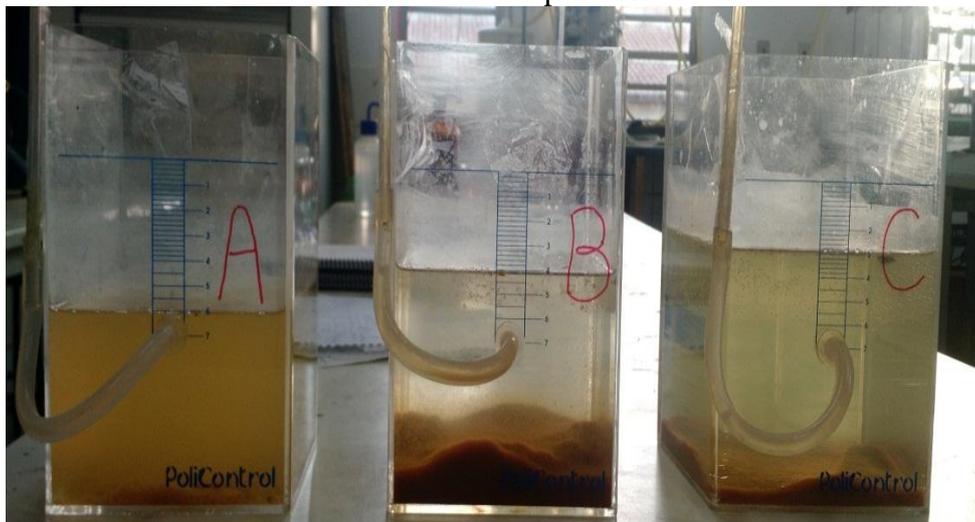
Amostras (Ensaio)	Resultados dos ensaios			
	DQO ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$)	% de redução de DQO	Turbidez (NTU)	% de redução de turbidez
Efluente bruto	$7.357,0 \pm 1.885,0$	-	$1.024,0 \pm 729,4$	-
A	$3.901,0 \pm 2.014,0$	46,9	$576,5 \pm 502,9$	43,7
B	$2.574,9 \pm 306,0$	65,0	$81,9 \pm 28,6$	92,0
C	$3.883,5 \pm 3.694,5$	47,2	$460,1 \pm 406,8$	55,0
Efluente tratamento Químico	$2.880,0 \pm 1371,0$	-	$176,2 \pm 139,6$	-
D	$943,0 \pm 471,5$	67,2	$63,6 \pm 47,7$	63,8
E	$662,4 \pm 211,9$	77,0	$10,5 \pm 3,6$	94,0
F	$738,5 \pm 370,5$	74,3	$60,9 \pm 42,6$	65,4

*Doses Fe^{2+} e H_2O_2 : (A e D – 0,66g/1,98mL); (B e E – 6,95g/20,15mL); (C e F – 3,47g/10,03mL).
Fonte: A autora

Conforme Tabela 6, observa-se boa eficiência na redução percentual de DQO e turbidez, uma vez que se obteve elevada remoção de matéria orgânica. Diante disso, constatou-se que tanto para os ensaios das amostras do efluente bruto (A, B e C), quanto para os ensaios das amostras do efluente tratado (D, E e F), as concentrações utilizadas nos ensaios B e E (6,95 gramas de FeSO_4 e 20,15 mL de H_2O_2), foram aquelas que proporcionaram maior redução de DQO e turbidez, sendo estas, as concentrações utilizadas nos ensaios seguintes.

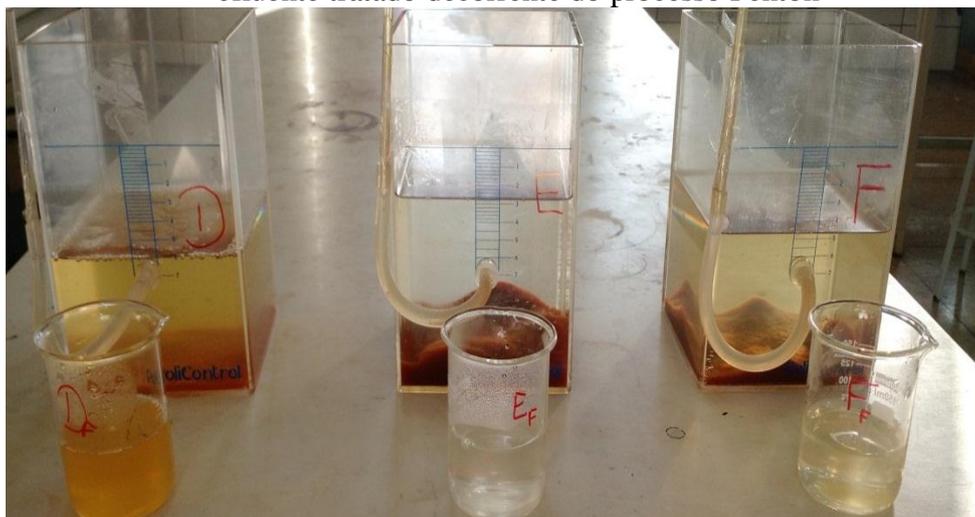
Ainda, na Tabela 6, verifica-se maior eficiência de remoção da DQO e da turbidez nas amostras do efluente tratado, o que pode ser confirmado por meio das Figuras 4 e 5. Este fato pode ser relacionado com a realização de processo químico pela empresa, favorecendo ainda mais o processo de redução da matéria orgânica.

Figura 4. Resultados da avaliação das concentrações de FeSO_4 e H_2O_2 na amostra de efluente bruto decorrente do processo Fenton



Fonte: A autora

Figura 5. Resultados da avaliação das concentrações de FeSO_4 e H_2O_2 nas amostras do efluente tratado decorrente do processo Fenton



Fonte: A autora

De acordo com as Figuras 4 e 5, observa-se o efeito das concentrações FeSO_4 e H_2O_2 , sendo possível visualizar maior sedimentação nos ensaios com maiores concentrações. Também, pode-se observar que o sobrenadante dos ensaios B e E são mais límpidos, sendo os demais, mais emulsionados. Ao compararmos B e E, nota-se que o ensaio E é mais límpido que o ensaio B.

De acordo com Favoretto et al. (2015), a combinação de processos pode aumentar a eficiência da remoção de um elemento ou constituintes associados ao efluente. Além disso, quando os processos Fenton ou foto-Fenton são utilizados como único, pré ou pós-tratamento

de efluentes, combinados a processos físico-químicos, o material particulado é primeiramente removido do efluente e depois são aplicados os processos Fenton/foto-Fenton para remoção de DQO, cor e odor (NOGUEIRA et al., 2007).

3.2.1.2. Determinação para Adição dos Reagentes

Com o resultado da melhor dosagem (concentrações dos ensaios B e E), realizou-se o estudo para verificar se os reagentes devem ser adicionados em uma única vez (no início do processo) ou de forma fracionada (uma parte no início e outra após um tempo da reação). Os resultados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados redução percentual de DQO e turbidez na avaliação da melhor dosagem em relação tempo da adição dos reagentes

Amostras (Ensaio)	Resultados dos Ensaio			
	DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	% de redução de DQO	Turbidez (NTU)	% de redução de Turbidez
Efluente bruto	7.357,0 ± 1.885,0	-	1.024,00 ± 729,4	-
A	2.123,5 ± 1.388,5	71,1	58,3 ± 51,1	94,3
B	5.080,2 ± 3.997,0	30,9	92,4 ± 82,4	90,9
Efluente tratamento químico	2.880,0 ± 1.371,0	-	176,2 ± 139,6	-
A	739,5 ± 258,8	74,3	5,5 ± 2,9	96,8
B	1.663,5 ± 415,8	42,2	9,2 ± 5,6	94,7

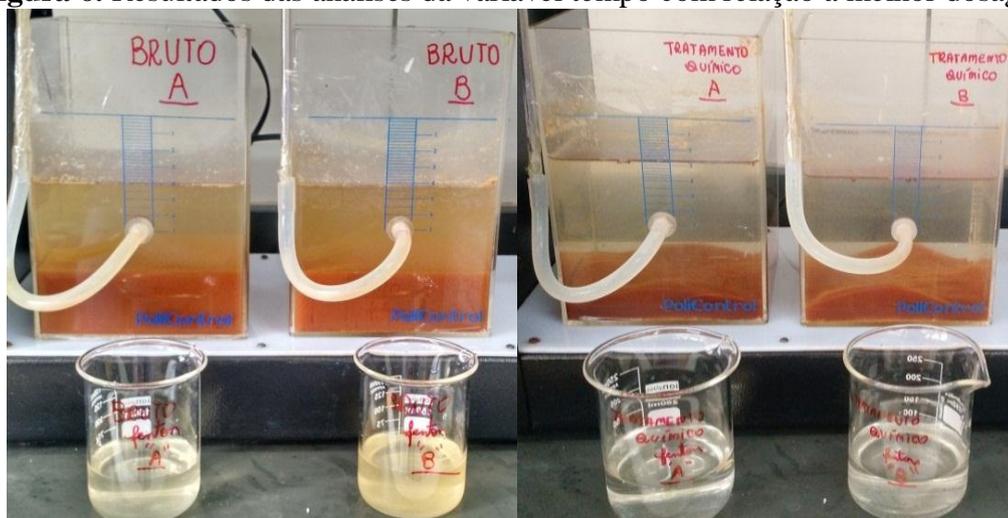
*(Ensaio A – todo o reagente adicionado no início da reação); (Ensaio B – Metade do reagente adicionado no início e metade após 1,5 horas). Fonte: A autora

Com base nos resultados obtidos apresentados na Tabela 7, verifica-se os reagentes devem ser aportados em uma única vez, no início do processo, uma vez que foram obtidas maiores remoções de DQO como de turbidez, com variações de até 40%, tanto para o efluente bruto, como para o tratado.

O teste A proporcionou maior remoção da carga orgânica que o teste B e, quando o reagente foi adicionado em uma única vez, obtiveram-se reduções na DQO iguais a 71,1% e 74,3% e na turbidez iguais a 94,3% e 96,8%, para o efluente bruto e efluente tratado, respectivamente.

A Figura 6 corrobora com os resultados obtidos, em que é possível notar maior sedimentação nos ensaios com efluente bruto e maior emulsificação, indicando que o efluente do tratamento químico proporcionou o melhor resultado com efluentes mais límpidos.

Figura 6. Resultados das análises da variável tempo com relação a melhor dosagem



Fonte: A autora

3.2.1.3. Estudo da Influência da Dosagem de Peróxido de Hidrogênio, Sulfato de Ferro (II) e pH

Para a realização deste estudo, novas análises dos efluentes foram realizadas, de modo a se determinar os valores médios de DQO e de turbidez. De acordo com os resultados, verificou-se que a DQO e a turbidez média no efluente bruto foi igual a $4.769 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ e de $88,4 \text{ NTU}$, respectivamente, enquanto no efluente tratado quimicamente pela empresa foi de e $2.272,5 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ e $186,7 \text{ UNT}$, respectivamente. Dessa forma, constatou-se que a empresa conseguia eficiência de remoção de $52,34\%$ para DQO e de $78,90\%$ para turbidez.

Uma vez definidas a concentração e o modo de adição dos reagentes (se em única vez ou fracionado) que proporcionava maior redução do teor de matéria orgânica, bem como a caracterização dos efluentes, procedeu-se a etapa do planejamento fatorial. Nas Tabelas 8 e 9 estão apresentados os resultados do planejamento experimental fatorial 2^3 para os efluentes brutos e tratados.

Tabela 8. Resultados obtidos da DQO e Turbidez ao final de cada experimento para o efluente bruto

Exp.	Concentrações			Resultados dos Ensaios (Média)		% de Redução	
	FeSO ₄ (gramas)	H ₂ O ₂ (mL)	pH	DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	Turbidez (NTU)	DQO (%)	Turbidez (%)
1	0,66	1,98	2	3.256,5	62,21	31,7	92,97
2	6,95	1,98	2	1.437	15,72	69,86	98,22
3	0,66	20,15	2	3.088	58,06	35,24	93,44
4	6,95	20,15	2	1.827	10,54	61,69	98,80
5	0,66	1,98	3	3.849	311,49	19,29	64,81
6	6,95	1,98	3	2.429,5	28,17	49,05	96,81
7	0,66	20,15	3	3.192	53,42	33,06	93,96
8	6,95	20,15	3	643,5	6,94	86,50	99,21

Fonte: A autora

De acordo como os resultados apresentados na Tabela 8, verificou-se que o experimento 8 proporcionou maior redução nos valores de DQO em relação à DQO inicial, com redução igual 86,50%, enquanto o experimento 5 apresentou a menor eficiência, com reduções iguais a 19,29%. Dessa forma, nota-se o efeito das concentrações tanto do Fe²⁺, quanto do H₂O₂ no processo Fenton, uma vez que o experimento 8 foi aquele em que se utilizou os maiores níveis destes reagentes, e no experimento 5, utilizou-se as menores concentrações.

Do mesmo modo, verificou-se que para os valores de turbidez, o experimento 8 proporcionou a melhor eficiência de remoção dos sólidos em suspensão igual a 99,21%, enquanto o experimento 5, com 64,81% de redução, apresentou a menor eficiência.

Apesar de uma menor eficiência obtida no experimento 5, verifica-se que este resultado é superior àqueles encontrados em sistemas de tratamentos que utilizam oxidação biológica para degradação dos poluentes, o que comprova a eficiência do processo na remoção de material suspenso e, conseqüentemente, do método de tratamento.

A Figura 7 corrobora com os resultados obtidos, indicando que o experimento 8 foi aquele que proporcionou melhor desempenho na remoção de DQO e turbidez, resultando numa maior sedimentação e sobrenadante mais límpido.

Figura 7. Resultados da matriz experimental das amostras do (Bruto) de cada experimento



Fonte: A autora

Já a Tabela 9 estão apresentados os resultados do planejamento experimental fatorial 2^3 para efluente tratado. Verifica-se que o experimento 8 foi aquele que proporcionou maior eficiência de remoção da DQO em relação à DQO inicial, com reduções iguais a 81,22%. Já o experimento 1, com apenas 15% de redução na DQO, foi aquele que apresentou a menor eficiência.

Tabela 9. Resultados obtidos DQO e Turbidez ao final de cada experimento para o efluente tratado

Exp.	Concentrações			Resultados dos Ensaio (Média)		% de Redução	
	FeSO ₄ (gramas)	H ₂ O ₂ (mL)	pH	DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	Turbidez (NTU)	DQO (%)	Turbidez (%)
1	0,66	1,98	2	1.931,62	58,44	15,00	68,71
2	6,95	1,98	2	1.137,16	22,87	49,96	87,75
3	0,66	20,15	2	1.492,57	56,7	34,32	69,64
4	6,95	20,15	2	569,03	2,06	74,96	98,89
5	0,66	1,98	3	1.848,23	71,03	18,67	61,97
6	6,95	1,98	3	1.279,42	61,54	43,70	67,05
7	0,66	20,15	3	1.777,1	93,49	21,80	49,94
8	6,95	20,15	3	426,78	1,52	81,22	99,18

Fonte: A autora

De acordo com a Tabela 9, verifica-se que a variável mais relevante para obtenção da maior eficiência de remoção de DQO foi o pH. Mantendo-se os valores de FeSO_4 e H_2O_2 iguais, verifica-se redução nos valores de DQO ao variar apenas o pH. E, dessa forma, verifica-se que em pH igual a 3, houve maior eficiência na remoção de DQO. Segundo Spinks & Woods (1990) citado por Martins (2011), valores de pH abaixo de 2,5 é prejudicial, já que a velocidade de degradação diminui apesar das espécies de Fe^{+2} permanecerem solúveis, pois altas concentrações de H^+ podem sequestrar radicais hidroxila.

Para os valores de turbidez, verifica-se maior eficiência na remoção de partículas suspensas no experimento 8, com reduções iguais a 99,18% e uma menor, com redução de 49,94%, no experimento 7. De acordo com Lin; Lin & Leu, (1999), quanto maior à concentração de íons ferrosos, maior a taxa de degradação, o que resulta em menor turbidez.

A Figura 8 corrobora com resultados apresentados na Tabela 9. Observa-se que o experimento 8 resultou maior remoção de Turbidez, o que conseqüentemente, proporcionando maior sedimentação e sobrenadante mais límpido.

Figura 8. Resultados da matriz experimental das amostras do efluente Tratado de cada experimento



Fonte: A autora

Dessa forma, verifica-se que o experimento 8 foi aquele que proporcionou maior eficiência de remoção de DQO e turbidez, tanto para o efluente bruto como para o efluente tratado quimicamente pela empresa. Nota-se que o processo Fenton para oxidação dos componentes presentes nos efluentes de laticínio é uma excelente alternativa, uma vez que conforme Torrades; Saiz & García-Hortal (2011), em sistemas de lagoas anaeróbias, a eficiência na remoção de poluentes está na ordem de 50 a 60%.

3.2.2. Processo Foto-Fenton

O processo Foto-Fenton utilizou-se as dosagens de peróxido de hidrogênio e de sulfato de ferro (II), bem como o valor de pH que proporcionaram maior eficiência na redução da matéria orgânica, obtidos no planejamento fatorial com o processo Fenton e, ainda, utilizou-se a irradiação emitida pela presença de uma lâmpada ultravioleta (UV) durante o período de repouso do processo.

A fim de comparar a eficiência do processo Fenton com aquele proporcionado pelo processo foto-fenton utilizou-se, para ambos os processos, o mesmo efluente. Na caracterização do efluente bruto, verificou-se um valor médio de DQO e Turbidez iguais a 8.932,3 mg O₂ L⁻¹ e 1.131,8 UNT, respectivamente. Já para o efluente tratado quimicamente pela empresa apresentou valor médio de DQO igual a 5.019,3 mg O₂ L⁻¹ e de 443,0 UNT para Turbidez. Portanto, a empresa conseguiu uma eficiência de remoção na DQO de 43,80%, e na Turbidez de 60,85%.

A partir dos dados de caracterização dos efluentes, realizou-se os experimentos do processo Fenton e Foto-Fenton em bancada, e os resultados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Comparação dos processos Foto-Fenton e Fenton nos diferentes efluentes utilizados

Amostras	Resultados das amostras			
	DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	% de Redução de DQO	Turbidez (UNT)	% de Redução de Turbidez
Efluente bruto	8.932,3 ± 4.184,5	-	1.131,8 ± 404,4	-
Fenton	1.411,3 ± 417,1	84,2	15,84 ± 2,3	98,6
Foto-Fenton	585,0 ± 175,3	93,4	5,7 ± 1,1	99,5
Efluente tratado	5.019,3 ± 2.029,5	-	443,0 ± 73,7	-
Fenton	963,7 ± 228,1	80,8	8,4 ± 1,4	98,1
Foto-Fenton	1.932,0 ± 528,2	61,5	110,2 ± 17,8	75,1

Fonte: A autora

Verifica-se, na Tabela 10, uma maior eficiência de remoção dos valores de DQO e turbidez do efluente bruto quando se utilizou o processo foto-fenton. Estes resultados estão de acordo com os estudos realizados por Vital Júnior et al. (2012), que justificou a maior

eficiência devido a presença de luz, que interfere diretamente no processo de degradação dos poluentes e, além de proporcionar maior decomposição do H_2O_2 , gerando um número maior de radical hidroxila.

Quando se utilizou o efluente tratado, o processo foto-fenton mostrou-se menos eficiente que o processo fenton, tanto para a eficiência de redução nos valores de DQO como nos valores de turbidez. De acordo Alves (2004) e Bidga (1995), alguns fatores podem afetar o processo oxidativo, tais como a dosagem de reagentes, sendo importante a relação entre a dosagem de oxidante e catalisador; o tipo de catalisador, o tempo de reação, o pH do meio e a temperatura.

Neste estudo, notou-se que para as amostras do efluente tratado no processo foto-fenton, o tempo de reação influenciou nos resultados, necessitando-se de um tempo maior em repouso, para assim, realizar-se a coleta da alíquota das amostras para as análises, e consequentemente, para uma maior eficiência do processo.

De modo geral, verificou-se que o processo que proporcionou maior eficiência na remoção da matéria orgânica e partículas suspensas ocorreram no efluente bruto e, quando comparado entre o processo Fenton e Foto-Fenton, verificou-se que o foto-fenton foi mais eficiente, conforme demonstrado na Figura 9.

Figura 9. Resultados da comparação dos processos Foto-Fenton e Fenton



Fonte: A autora

Diante dos resultados apresentados e, conforme Vital Júnior et al. (2012), percebe-se a possibilidade de um vasto estudo a respeito do desenvolvimento de tratamento de efluentes utilizando-se reagentes químicos de baixo custo associado a luz solar como fonte de radiação direta. Ainda segundo este autor, o processo Foto-Fenton representa uma técnica simples, de

fácil aplicabilidade e viável economicamente, sendo capaz de promover a descontaminação dos efluentes da produção industrial de derivados do leite.

3.2.3. Processo Foto sem Adição de Reagentes

Após os estudos realizados com processos fenton e foto-fenton no tratamento de efluentes de laticínios, procedeu-se a realização do processo foto, sem a adição de reagentes, tanto para o efluente bruto, como para o efluente tratado quimicamente pela empresa. Os resultados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Comparação do processo Foto sem Adição de Reagentes realizadas com os diferentes efluentes estudados

Amostras	Resultados das amostras			
	DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	% de Redução de DQO	Turbidez (NTU)	% de Redução de Turbidez
Efluente bruto	9.907,0 ± 4.061,8	-	1.105,0 ± 385,6	-
Efluente bruto Foto sem Reagentes	4.151,0 ± 1245,3	58,1	225,5 ± 83,4	75,0
Efluente tratado	4.245,0 ± 1698,0	-	422,2 ± 168,4	-
Efluente tratado Foto sem Reagentes	3.774,0 ± 1698,3	11,0	149,8 ± 62,76	35,7

Fonte: A autora

Conforme Tabela 11, verifica-se uma redução na DQO igual a 58,1% quando é realizado o processo foto sem adição de reagentes ao efluente bruto e, uma redução de 11% quando aplicado ao efluente tratado. Já em relação a turbidez, verifica-se uma eficiência de remoção igual a 75,0% em relação ao esgoto bruto e, 35,7% em relação ao efluente tratado. Dessa forma, evidencia-se a influência do UV, mesmo sem a utilização de reagentes químicos.

Analisando todos os resultados obtidos, percebeu-se que a redução DQO está dentro dos limites para lançamento em corpos hídricos pela DN COPAM/ CERH - MG nº 01/08, exceto para o processo Foto-Fenton com o efluente tratado, e o experimento utilizando somente a lâmpada UV.

3.2.4. Lodo dos POA's

Depois de realizado os tratamentos dos efluentes com POA's e processo foto sem a adição de reagentes, realizou-se caracterização físico-química dos lodos gerados com objetivo de verificar a remoção da carga orgânica residual. Para isso, inicialmente, realizou-se a determinação dos sólidos totais e em suspensão dos efluentes bruto e tratado quimicamente pela empresa, de modo a possibilitar a comparação entre as quantidades de lodo gerado nos diferentes processos.

Os resultados das caracterizações permitiram verificar que o efluente bruto apresentava concentração de sólidos totais igual a 6.326,0 mg L⁻¹ e de sólidos em suspensão iguais a 28,0 mL L⁻¹. Já o efluente tratado apresentou valores de sólidos totais e sólidos sedimentáveis iguais a 4.738,0 mL L⁻¹ e 35,0 mL L⁻¹, respectivamente. Observa-se, portanto, que o efluente bruto apresentava maior quantidade de resíduo ou matéria orgânica e uma menor sedimentação, e conseqüente, maior quantidade de lodo.

Na Tabela 12 estão apresentados os valores da quantidade do lodo gerado conforme as metodologias mencionadas no item 2.2.1, mensurados por meio das análises de sólidos sedimentáveis e sólidos totais.

Tabela 12. Resultados da caracterização físico-química do lodo gerado no POA's e no processo foto sem a adição de reagentes

Amostras	Parâmetros	
	Sólidos Totais (mg L ⁻¹)	Sólidos Sedimentáveis (mL L ⁻¹)
Efluente bruto Fenton	37.395,0	800,0
Efluente bruto Foto-Fenton	11.646,0	500,0
Efluente bruto Foto s. R.	6.720,0	1000,0
Tratado Fenton	27.043,0	480,0
Tratado Foto-Fenton	22.144,0	700,0
Tratado Foto s. R.	4.934,0	35,0

Fonte: A autora

De acordo com os resultados, nota-se que os POA's geram grande quantidade de lodo, embora apresentem elevada eficiência de tratamento da carga orgânica.

Verifica-se incrementos na produção de sólidos totais e sólidos em suspensão com a elevação da carga orgânica, com maiores valores para o efluente bruto em relação ao tratado, a exceção do tratamento foto-fenton, que apresentou maior produção de sólidos totais e sólidos em suspensão no efluente tratado. Fato este, que confirma os resultados das análises de DQO e Turbidez, no item 3.2.2.

Mediante ao exposto, verificou-se que a concentração de sólidos totais dos efluentes após processo oxidativo avançado aumentou de forma significativa, indicando incrementos na geração de lodo, obtendo valor de até mesmo 500% acréscimo. Confirmando-se, assim, o estudo realizado por Von Sperling (2001), em que o lodo pós-POA/Fenton apresentou como péssima sedimentabilidade ($> 300 \text{ mL.g}^{-1}$), o que tornou sua separação por sedimentação pouco atrativa.

Os ensaios feitos com o reagente Fenton geram massa de lodo basicamente composta pelo ferro precipitado como hidróxido de ferro e outros sais. Sendo assim, o lodo deve ser disposto de forma adequada, ou seja, recolhida por empresas responsáveis por resíduos industriais.

Portanto, verifica-se que o sistema proposto apresenta elevada eficiência de remoção de carga orgânica, facilidade operacional com flexibilidade no controle de variáveis do processo, simplicidade de equipamento e facilidade na mudança de escala de produção. Todavia, trata-se de um processo que gera uma quantidade significativa de lodo, necessitando, portanto, da realização de estudos para tratamento, reaproveitamento e disposição final do lodo gerado.

4. CONCLUSÃO

Com base no trabalho realizado e os resultados obtidos durante todas as etapas do estudo, pode-se concluir:

- A partir da caracterização do efluente evidencia-se a necessidade de se realizar um tratamento mais eficaz para que o mesmo seja enquadrado segundo os parâmetros estabelecidos tanto na Resolução CONAMA 430/11 quanto à DN COPAM/CERH-MG 01/2008.

- Verificou-se que a melhor eficiência de remoção da carga orgânica foi obtida quando se utilizou 6,95 g de Fe^{2+} e 20,15 mL de H_2O_2 adicionados em uma única vez, no início do processo de tratamento, em pH 3;
- O processo Foto-Fenton apresentou maior eficiência de remoção da carga orgânica que o processo Fenton, no efluente *in natura*.
- Em todos os resultados obtidos, percebe-se redução DQO dentro dos limites para lançamento em corpos hídricos pela DN COPAM/ CERH - MG nº 01/08, exceto para o Foto-Fenton para efluente tratado e no experimento utilizando somente a lâmpada UV;
- Os processos Fenton e Foto-Fenton geram grandes quantidades de lodo, embora apresentem elevada eficiência de tratamento da carga orgânica.

5. REFERÊNCIAS

Alves, J. F. **Aplicação do Reagente de Fenton no Tratamento de Líquidos Lixiviados de Aterros Sanitários**. 2004. 262 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. Belo Horizonte, 2004.

American Public Health Association - APHA, Awwa American Water Works Association – AWWA, Water Environment Federation - WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 ed. New York, 2012.

Aquarone, E. Borzani, W., Lima, U. A. **Biotecnologia: tópicos de microbiologia industrial**. 2 ed., v. 2. São Paulo: Edgard Blücher, 1990.

Araújo, S. de A., Antonelli, R., Gaydeczka, B., Granato, A. C., Malpass, G. R. P. Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. **Revista Ambiente & Água**. v. 11, n. 2, p. 387 - 401, 2016.

Azzolini, J. C., Frinhani, E. de M. D., Fabro, L. F. Águas industriais: controle físico-químico e biológico do efluente e medida da eficiência do tratamento na agroindústria. **Unoesc & Ciência – ACET**. v. 2, n. 1, p. 7 - 18, 2011.

Baird, C. **Química Ambiental**. 2 ed., v. 2. Porto Alegre: Bookman. 2002.

Bautista, P., Mohedano, A. F., Casas, J. A., Rodriguez, J. J. An overview of the application of Fenton oxidation to industrial wastewaters treatment. **Journal Chemical Technology Biotechnology**. v. 83, p. 1323 - 1338, 2008.

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

Bridga, R .J. Consider Fenton's Chemistry for Wastewater Treatment. **Chemical Engineering Progress**. v. 91, p. 62 - 66, 1995.

Brillas, E., Sires, I., Oturan, M. A. Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton's reaction chemistry. **Chemical Reviews**. v. 109, p. 6570 - 6631, 2009.

Brito, N. N., Silva, V. B. M. Processo Oxidativo Avançado e sua Aplicação Ambiental. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil - REEC**. v. 3, n. 1, p. 36 – 47, 2012.

Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG Nº 01 de 05 de maio de 2008**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 2008.

Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução nº 430 de 13 de Maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. 2011.

Favoretto, D. P. C., Brião, V. B., Colla, L. M., Hemkermeier, M. Análise técnica do processo de tratamento de efluentes de empresa de laticínios da região de Passo Fundo/RS. **Revista CIATEC – UPF**. v. 7, n. 2, p. 18 - 30, 2015.

Fioreze, M., Santos, E. P., Schmachtenberg, N. Processos Oxidativos Avançados: fundamentos e aplicação ambiental. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET**. v. 18, n. 1, p. 79 – 91, 2014.

Florêncio, T. M., Malpass, G. R. P. A brief explanation about environmental licenses in Brazil. **The Nexus – American Chemical Society**, v. 9, n. 1, p. 1 – 14, 2014.

HERNANDEZ, R.; ZAPPI, M.; COLLUCI, F.; JONES, R. Comparing the performance of various advanced oxidation process for treatment of acetone contaminated water. **Journal Hazardous Materials**, v. 92, p. 33 - 50, 2002.

Kempka, A. P.; Pagliarini, C. L.; Gomes, G. de A.; Robazza, W. da S. Estudo das concentrações de ferro e peróxido de hidrogênio na oxidação química de efluente proveniente de laticínio. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**. v. 9, n. 1, p. 190 - 197, 2012.

Lange, L. C., Alves, J. F., Amaral, M. C. S., Melo, W. R. J. Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processo oxidativo avançado empregando reagente de Fenton. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 11, n. 2, p. 175 – 183, 2006.

Lima, J. E. F. W. Situação e perspectivas sobre as águas do cerrado. **Ciência e Cultura**. v. 63, n. 3, p. 27 – 29, 2011.

Lin, S. H., Lin, C. M., Leu, H. G. Operating characteristics and kinetic studies of surfactant wastewater treatment by Fenton oxidation. **Water Research**. v. 33, n. 7, p. 1735 - 1741, 1999.

Lopez, A., Mascolo, G., Detomaso, A., Lovecchio, G., Villani, G. Temperature activated degradation (mineralization) of 4-chloro-3-methyl phenol by Fenton's reagent. **Chemosphere**. v.59, p. 397 - 403, 2004.

Machado, R. M. G., Freire, V. H., Silva, P. C. Alternativas tecnológicas para o controle ambiental em pequenas e médias indústrias de laticínios. In: **Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Porto Alegre, RS, 2000.

Martins, L. M. **Estudo da aplicação de processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes têxteis visando o seu reuso**. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Desenvolvimento e Meio Ambiente, TROPEN, UFP. Piauí, 2011.

Martins, L. M., Silva, C. E., Moita Neto, J. M., Lima, A. S., Moreira, R. de F. P. M. Aplicação de Fenton, foto-Fenton e UV/H₂O₂ no tratamento de efluente têxtil sintético contendo o corante Preto Biozol UC. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.16, n.3, p. 261 – 270, 2011.

Melo, S. A. S., Trovó, A. G., Bautitz, I. R., Nogueira, R. F. P. Degradação de fármacos residuais por processos oxidativos avançados. **Química Nova**. v. 32, p. 188 - 197, 2009.

Nogueira, R.F. P., Trovó, A. G., Silva, M. R. A., Villa, R. D., Oliveira, M. Fundamentos e Aplicações Ambientais dos Processos Fenton e Foto-Fenton. **Química Nova**. v. 30, n. 2, p. 400 - 408, 2007.

Pera-Titus, M., García-Molina, V., Banos, M. A., Gimenez, J., Esplugas, S. Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: a general review. **Applied Catalysis B: Environmental**. v. 47, p. 219 - 256, 2004.

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

Philippopoulos, C. J., Pouloupoulos, S. G. Photo-assisted oxidation of an oily wastewater using hydrogen peroxide. **Journal of Hazardous Materials B**. v. 98, p. 201 – 210, 2003.

Salah, N. H., Bouhelassa, M., Bekkouche, S., Boultif, A. Study of photocatalytic degradation of phenol. **Desalination**. v. 16, n. 6, p. 347 - 354, 2004.

Salazar, R. F. dos S. **Aplicação de processo oxidativo avançado (POA) como pré-tratamento de efluente de laticínio para posterior tratamento biológico**. 2009. 210f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, 2009.

Silva, V. B., Dias, F. F. da S. Uso da Técnica Foto-Fenton como Alternativa de Tratamento de Efluentes de Laticínios. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**. v. 7, n. 2, p. 316 – 321, 2017.

Souza, C. R. L., Peralta-Zamora, P. Degradação de corantes reativos pelo sistema ferro metálico/peróxido de hidrogênio. **Química Nova**. v. 28, n.2, p.226 - 228, 2005.

Spinks, J. W. T., Woods, R. J. **An Introduction to Radiation Chemistry**, 3 ed. John Wiley & Sons: Nova York, 1990.

Sousa, A. **Processo fenton homogêneo no tratamento do lixiviado de aterro sanitário: avaliação de custos e remoção de DQO**. 2017. 54f. Trabalho Final de Curso (Graduação) - Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2017.

Torrades, F., Saiz, S., García-Hortal, J. A. Using central composite experimental design to optimize the degradation of black liquor by Fenton reagent. **Desalination**. v. 268, n. 1, p. 97 – 102, 2011.

Valverde, R. P., Morais, A. C. M., Caixeta, L. R., Carneiro, G.T. Viabilidade no tratamento de efluente industrial através da utilização de reagente de fenton e fotocatalise heterogênea. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil – REEC**. v. 11, n. 1, p. 35 – 45, 2016.

Villa, R. D., Silva, M. R. A., Nogueira, R. F. P. Potencial de Aplicação do Processo Foto-Fenton/Solar Como Pré-Tratamento de Efluente da Indústria de Laticínios; **Química Nova**. v. 30, 8, 1799 - 1803, 2007.

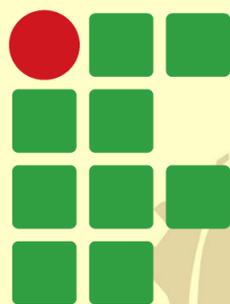
Vital Júnior, M. R., Silva, W. O., Paiva, E. C. B., Azevedo, P. V. de S., Santos, E. L., Rocha, P. F. Tratamento de efluentes da indústria de laticínio pelo processo Fenton. In: **VII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, CONNEPI**. Tocantins, TO, v. 1, p. 1 – 7, 2012.

Vogelpohl, A. Applications of AOPs in wastewater treatment. **Water Science & Technology**. v. 55, n. 12, p. 207 - 211, 2007.

Von Sperling, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: princípios básicos do tratamento de esgoto**. v. 2. Belo Horizonte: UFMG, 1996.

Von Sperling, M. Dimensionamento de lodos ativados por batelada utilizando os princípios da teoria do fluxo de sólidos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 6, n. 3/4, p. 147 – 156, 2001.

Von Sperling, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed., v. 1, Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte: UFMG, 2005.



INSTITUTO FEDERAL

Goiano

Campus
Urutaí

