

## TRATAMENTO DE EFLUENTE DE LATICÍNIO POR PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO TIPO FENTON-FOTOCATALISADO

Layanne R. da Silva<sup>a,\*</sup>, Ana Paula T. Rocha<sup>a</sup>, Gilmar T. de Araujo<sup>a</sup>, Thais J. R. Araujo<sup>b</sup>, Douglas V. P. de Figueiredo<sup>b</sup> e Josivanda P. Gomes<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Campina Grande, 58429-900 Campina Grande – PB, Brasil

<sup>b</sup>Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, 58429-900 Campina Grande – PB, Brasil

Recebido em 03/07/2023; aceito em 23/11/2023; publicado na web 25/01/2024

TREATMENT DAIRY INDUSTRY WASTEWATER BY ADVANCED OXIDATION PROCESSES PHOTOCATALYSIS-SELF-FENTON SYSTEM. With the increase in industrial production, there is a direct increase in waste generation. Milk processing industries are one of these cases that results in a complex effluent with a high organic load. If the effluent is discarded without proper treatment, it can compromise the survival of biota in water courses. Advanced oxidation processes (AOP) are one of the main technologies used in the treatment of effluents, especially the Photocatalysis-Self-Fenton System (PF) type. The present study aimed to evaluate the efficiency of the PF process and to optimize the parameters of dairy effluent treatment. The raw effluent was characterized considering the parameters: conductivity, pH, chemical oxygen demand (COD), solids, and oils and greases. Through an experimental design, the variation of the concentrations of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  and the reaction time were optimized, and the influence of these three variables on the removal of COD was evaluated. Statistical analysis showed that all variables were statistically significant, and the model used had a coefficient of determination of 0.97, confirming that the model was well adjusted. The ideal conditions for COD removal, reaching 79%, were obtained in 60 min,  $0.625 \text{ g L}^{-1}$  of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $0.829 \text{ mL L}^{-1}$  of  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

Keywords: Fenton-photocatalyst; dairy industry; advanced oxidation processes; wastewater treatment.

### INTRODUÇÃO

A água é um recurso indispensável para indústria de alimentos, uma vez que boa parte do processo produtivo requer volumes consideráveis de água para diversos fins, como resfriamento, integração nos produtos, limpeza, dentre outras etapas. No entanto, essa interdependência entre a água e a indústria, resulta na geração substancial de efluentes, consolidando a indústria alimentícia como uma das principais fontes de descarga de substâncias residuais no meio ambiente.<sup>1,2</sup>

Em muitos países, a indústria de laticínios é considerada a maior fonte de águas residuais devido à alta produção. Por produzir uma grande variedade de produtos como leite, queijo, manteiga, iogurtes, dentre outros, resulta em um efluente de composição variada e complexa. Geralmente, os efluentes de laticínio contêm alta concentração de materiais orgânicos, incluindo carboidratos, lipídios, proteínas, que contribuem para uma alta demanda química de oxigênio (DQO). Esse tipo de efluente contribui para a eutrofização da água por ser um resíduo altamente nutritivo, o que permite o rápido crescimento de algas e bactérias, consumindo assim grande quantidade do oxigênio disponível no ambiente aquático, o que pode causar a morte de animais e plantas.<sup>3,4</sup>

Processos oxidativos avançados (POA) tem se tornando uma opção interessante para remoção de compostos orgânicos de águas residuais e apresentam vantagens no tratamento de efluentes mais complexos, como é o caso dos laticínios. Nesses processos ocorre a mineralização de grande parte dos contaminantes orgânicos e através de uma série de reações químicas os contaminantes presentes no efluente são transformados em dióxido de carbono, água e ânions.<sup>5,6</sup>

Entre os POA encontra-se o processo Fenton-fotocatalisado, que consiste na geração de radicais de hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ) pela decomposição do peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) catalisado por

$\text{Fe}^{2+}$  em meio ácido, onde apresenta grande eficiência na remoção de uma gama alta de compostos orgânicos. A irradiação solar aumenta a eficiência da degradação dos compostos orgânicos. Comparando com outras técnicas químicas ou eletroquímicas, o Fenton-fotocatalisado tem atraído bastante destaque, devido ao baixo custo e consumo de energia, tendo em vista que a energia solar é de fonte inesgotável. Além disso, esse processo ocasiona um efeito sinérgico, o que resulta em um alto desempenho na degradação de poluentes orgânicos.<sup>7,8</sup>

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência na remoção da carga orgânica de efluente da indústria de laticínios, tratado com o processo oxidativo avançado, tipo Fenton-fotocatalisado, avaliando o efeito da concentração da solução Fenton ( $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ ) e do tempo sobre o processo.

### PARTE EXPERIMENTAL

#### Matéria-prima

O efluente utilizado nesta pesquisa foi fornecido por uma indústria processadora de laticínios, localizada no Cariri Paraibano, efluente este que foi coletado de lagoa de estabilização. Foram coletados cerca de 20 L do efluente em garrafa de polietileno previamente higienizada, em seguida foi transportado em caixa térmica com gelo e temperatura média de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Após a coleta foi fracionado em porções de 500 mL e 1000 mL em garrafas de polietileno e armazenadas em freezer à temperatura de  $-3 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2$ , com o intuito de manter todas as características originais do efluente evitando ao máximo a sua degradação. Para realizar os experimentos uma porção proporcional ao que seria utilizado era retirada do freezer no dia anterior aos ensaios e colocada em refrigerador com temperatura média de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . As amostras de efluente foram mantidas no freezer por 40 dias.

\*e-mail: laayanne1@gmail.com

## Caracterização do efluente

Os parâmetros avaliados foram definidos previamente, baseado em experiências anteriores em trabalhos com outros efluentes. O efluente bruto foi caracterizado físico-quimicamente seguindo metodologia descrita em *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater*.<sup>9</sup>

### Condutividade e pH

A determinação da condutividade e pH foi obtida por leitura direta em condutivímetro e pHmetro portátil da marca KKMoon, modelo Tri-meter previamente calibrado.

### Demanda química de oxigênio (DQO)

A demanda química de oxigênio do efluente foi determinada por oxidação catalisada da matéria orgânica e inorgânica oxidável, por dicromato de potássio em meio ácido, segundo metodologia padrão.<sup>9</sup> A DQO foi determinada por leitura da absorbância em espectrofotômetro UV-Vis Cary 60 (Agilent Technologies), por leitura em  $\lambda = 600$  nm. A DQO do efluente foi determinada antes de ser congelado e, a cada nova fração descongelada era submetido a nova determinação para verificar sua estabilidade.

### Sólidos totais (ST)

Uma quantidade conhecida da amostra foi colocada em uma cápsula de porcelana previamente seca e pesada, e levada a estufa, a 105 °C, até total evaporação da parte líquida e obtenção de massa constante. O percentual de sólidos totais foi determinado segundo a Equação 1.

$$ST = \frac{(M - M_0)}{V} \times 100 \quad (1)$$

onde: ST: sólidos totais (mg L<sup>-1</sup>); M<sub>0</sub>: massa inicial da cápsula de porcelana (g); M: massa da cápsula de porcelana com amostra após secagem (g); V: volume de amostra (mL).

### Sólidos suspensos totais (SST)

Um papel filtro qualitativo devidamente seco e pesado foi utilizado na filtração a vácuo de 25 mL do efluente. O papel utilizado foi levado para evaporação em estufa a 105 °C, até obtenção de massa constante. Para cálculo foi utilizada a Equação 2.

$$SST = \frac{(M - M_0)}{V} \times 100 \quad (2)$$

onde: SST: sólidos suspensos totais (mg L<sup>-1</sup>); M<sub>0</sub>: massa inicial do papel filtro (g); M: massa do filtro com amostra após secagem (g); V: volume de amostra (mL).

### Concentração de óleos e graxas

A concentração de óleos e graxas (O&G) foi determinada pelo método utilizando clorofórmio seguindo a metodologia descrita por Curbelo,<sup>10</sup> com resultados obtidos através de leitura utilizando espectrofotômetro UV-Vis, Agilent Technologies. Para realizar a determinação, foi realizada uma varredura para determinar o comprimento de onda de máxima absorbância, então foi plotado uma curva de calibração (absorbância versus concentração, R<sup>2</sup> = 0,9812) para determinar o teor de O&G.

### Preparo das soluções Fenton

Conforme mostrado na Tabela 1, o planejamento composto central rotacional (DCCR) 2<sup>3</sup> + 6 pontos axiais + 3 pontos centrais, onde o efeito das variáveis independentes foi investigado em cinco níveis diferentes. A variável resposta analisada foi o teor de orgânicos residuais após o tratamento Fenton-fotocatalisado, em forma de % remoção de DQO.

**Tabela 1.** Parâmetros independentes e níveis no planejamento DCCR

Parâmetros	Níveis				
	-α	-1	0	+1	+α
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0,829	1,0	1,25	1,50	1,67
Fe <sup>2+</sup>	0,015	0,25	0,625	1,0	1,27
Tempo	34	45	60	75	85

### Análise estatística

Os efeitos das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes foram avaliados mediante análise estatística utilizando o programa computacional Statistica versão 7.0.<sup>11</sup>

### Ensaio de degradação

Os experimentos foram realizados em reator de vidro de 100 mL, onde eram adicionados 20 mL da solução Fenton e 20 mL de efluente. O pH foi ajustado na faixa de 2,5 a 3,0, uma vez que somente dentro dessa faixa de pH o Fe<sup>2+</sup> é solúvel em água.<sup>12</sup> Então, as amostras eram mantidas sob agitação por agitadores magnéticos e expostas a luz solar. O tempo de agitação seguiu o planejamento experimental.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização do efluente

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos para todos os parâmetros do efluente de laticínio comparando com duas legislações vigentes no Brasil para emissão de efluentes.

**Tabela 2.** Caracterização do efluente de laticínio

Parâmetro	Unidade	Efluente	CONAMA 430/2011	COPAM No.1/2008
pH	-	7,17	5-9	6-9
Sólidos totais (ST)	mg L <sup>-1</sup>	500	-	-
Sólidos suspensos totais (SST)	mg L <sup>-1</sup>	370,33	-	100
DQO	mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	630,8	-	180
Óleos de graxas	mg L <sup>-1</sup>	613,58	*	-
Condutividade	μS m <sup>-1</sup>	5,7	-	-

\*Limite de óleos e graxas para lançamento de efluentes: óleos minerais até 20 mg L<sup>-1</sup> e óleos vegetais e gorduras até 50 mg L<sup>-1</sup>.

O pH exerce um impacto direto na taxa de degradação durante o processo de tratamento, ou seja, as macromoléculas são desdobradas e convertidas em moléculas menores. Isso, por sua vez, afeta a decomposição de macromoléculas maiores, como carboidratos, lipídios e proteínas. Por isto é recomendado que o efluente esteja numa faixa entre 5-9.

O teor de sólidos totais desempenha um papel fundamental no aumento da matéria orgânica, tornando assim mais desafiadora a degradação pelos microorganismos. Enquanto que os sólidos suspensos, que se acumulam na superfície da lagoa, bloqueiam a entrada de luz solar. Esse bloqueio não apenas eleva a temperatura da lagoa, mas também transforma o ambiente inicialmente aeróbio em um ambiente completamente anaeróbio.

Como o estado da Paraíba não possui uma legislação própria que indique os padrões de lançamentos de efluente, os dados obtidos foram comparados com Normas técnicas de outros estados, para se avaliar a qualidade do efluente para o lançamento em corpos hídricos. A norma mineira (COPAM No. 1/2008), indica um limite de DQO de 180 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>, logo o valor encontrado de 630,8 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> está 250% acima do permitido. Já a norma pernambucana, NT No. 2/2001 da CPRH, não define limite de lançamento, porém exige que laticínios reduzam, no mínimo, em 60% a carga orgânica (DQO) do efluente.

Não são todos os efluentes que necessitam de caracterização quanto ao parâmetro de óleos e graxas, porém, por este trabalho usar como fonte de estudo efluente de laticínios e por sua principal matéria-prima ser o leite, o entendimento desse parâmetro adquire relevância, uma vez que está associado ao incremento da concentração de matéria orgânica no efluente, o que resulta em maior complexidade para sua degradação, especialmente devido ao fato de que as moléculas de lipídios são moléculas maiores.

### Aplicação do POA

A Tabela 3, mostra os resultados obtidos após tratamento Fenton-fotocatalisado realizado seguindo planejamento experimental.

Segundo a Tabela 3, observa-se uma redução de 79,30%, na concentração de DQO, para as condições descritas no experimento

**Tabela 3.** Resultados de remoção de DQO após tratamento Fenton-fotocatalisado

Experimento	Concentrações		Tempo (min)	% Remoção de DQO
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mL L <sup>-1</sup> )	Fe <sup>2+</sup> (g L <sup>-1</sup> )		
1	1,0	0,25	45	58,18
2	1,0	0,25	75	61,27
3	1,5	0,25	45	62,73
4	1,5	0,25	75	64,78
5	1,0	1,0	45	63,69
6	1,0	1,0	75	68,29
7	1,5	1,0	45	55,49
8	1,5	1,0	75	58,70
9	0,829	0,625	60	79,30
10	1,67	0,625	60	74,21
11	1,25	0,015	60	57,60
12	1,25	1,25	60	67,82
13	1,25	0,625	34	43,12
14	1,25	0,625	85	50,97
15	1,25	0,625	60	73,74
16	1,25	0,625	60	75,09
17	1,25	0,625	60	74,29

de número 9. A variação de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e Fe<sup>2+</sup> junto da variação do tempo de exposição, objeto de estudo neste trabalho, apresentou capacidade de redução de DQO superior ao encontrado por Dias *et al.*,<sup>13</sup> que empregaram o processo oxidativo avançado em efluente de laticínio, utilizando como reagentes o peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), conseguindo um redução máxima de 50,8% do valor inicial de DQO. Enquanto que Correa *et al.*,<sup>14</sup> atingiram uma remoção de 92%, utilizando uma combinação de tratamento do mesmo tipo de efluente, a flotação e emprego em reator de leito fixo.

Tratando da interferência do tempo pode ser visto na Tabela 3, 43% de redução de DQO foi atingida em 34 min (experimento 13), no entanto remoções superiores a 60% só foram atingidas a partir de 45 min. O tempo se mostrou como a variável que teve o impacto mais significativo sobre o tratamento aplicado, conforme mostra as análises estatísticas expostas a seguir.

### Análise estatística dos resultados

Na análise de variância (ANOVA), os termos significativos foram identificados com um nível de confiança de 95%. Os resultados da ANOVA estão na Tabela 4, com coeficiente de determinação R<sup>2</sup> = 0,97, onde observa-se que as três variáveis de entrada: Fe<sup>2+</sup>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e tempo, apresentam efeitos significativos sobre a porcentagem de remoção de DQO, a um nível de significância de 5%, no tratamento Fenton-fotocatalisado com luz solar. A interação entre o tempo e as concentrações de Fe<sup>2+</sup> e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, não foram significativas estatisticamente.

Para melhor visualização da análise anterior foi plotado o gráfico de Pareto, representado na Figura 1, onde a linha tracejada (parâmetro p) indica o valor do t tabelado para realizar análise estatística. Os fatores ou interações que ultrapassam esta linha são aqueles que apresentam efeitos significativos na variável resposta, ou seja, no percentual de remoção de DQO.

Todas as variáveis de entrada mostraram-se estatisticamente significativas tanto em termos quadráticos (Q) quanto em termos lineares (L) do processo, e quando trata-se da interação entre as variáveis, apenas a interação entre a concentração do Fe<sup>2+</sup> com o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1Lby2L) apresentou interferência no processo. Observando o parâmetro p, nota-se que a variável tempo foi a que apresentou maior influência no processo.

Analisando o efeito das variáveis independentes sobre a variável dependente, remoção de DQO, por meio de diagrama de Pareto, ilustrado na Figura 1, pode-se observar os maiores efeitos sobre a variável dependente são causados pelas variáveis tempo e concentração de do íon ferroso na solução Fenton. Observa-se que para as três variáveis independentes, um aumento dessas variáveis provoca uma redução no valor da DQO e que os termos quadráticos (Q) das variáveis analisadas tempo e Fe<sup>2+</sup>, apresentaram respectivamente, maior significância estatística. Ou seja, um aumento no tempo de tratamento e na concentração de Fe<sup>2+</sup> na solução Fenton, contribuirá efetivamente para uma maior eficiência do processo favorecendo uma maior redução na DQO.

Foi plotado um gráfico valores observados *versus* valores previstos para verificar a equação do modelo (Figura 2), onde mostra uma concordância entre os valores reais e previstos, o que implica dizer que o modelo pode ser usado para estimar valores de DQO no tratamento utilizado.

A equação final (Equação 3) obtida em termos de variáveis reais para a eficiência de remoção de DQO é a seguinte:

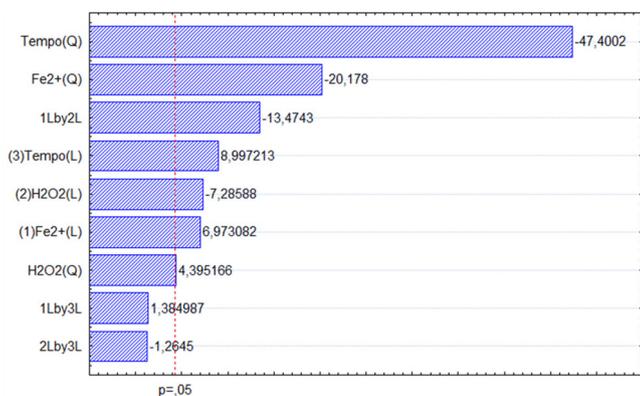
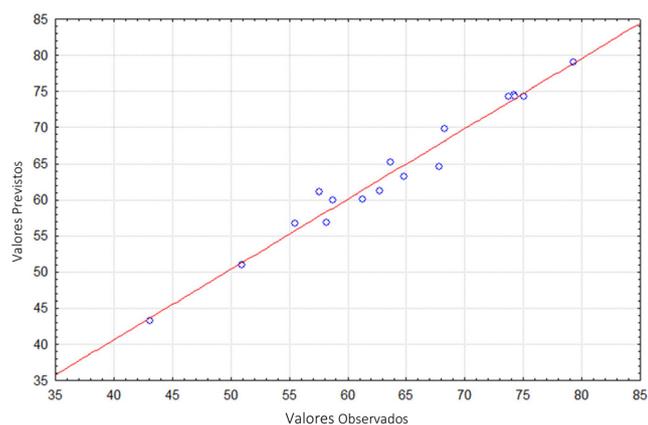
$$\%Rem (DQO) = 74,92 + 2,57X_1 - 8,37X_1^2 - 2,67X_2 + 1,77X_2^2 + 3,99X_3 - 18,78X_3^2 - 6,46X_1X_2 + 0,66X_1X_3 - 0,60X_2X_3 \quad (3)$$

onde: X<sub>1</sub> = Fe<sup>2+</sup>; X<sub>2</sub> = H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; X<sub>3</sub> = tempo.

**Tabela 4.** Análise de variância para planejamento composto central

Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F	p
(1) Fe <sup>2+</sup> (L)	22,381	1	22,381	48,624	0,019953
Fe <sup>2+</sup> (Q)	187,404	1	187,404	407,152	0,002447
(2) H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (L)	24,434	1	24,434	53,084	0,018322
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (Q)	8,891	1	8,891	19,317	0,048065
(3) Tempo (L)	37,260	1	37,260	80,950	0,012129
Tempo (Q)	1034,147	1	1034,147	2246,778	0,000445
Interação 1L × 2L	83,567	1	83,567	181,558	0,005463
Interação 1L × 3L	0,883	1	0,883	1,918	0,300314
Interação 2L × 3L	0,736	1	0,736	1,599	0,333455
Falta de ajuste	38,439	5	7,688	16,702	0,057450
Erro puro	0,921	2	0,460		
Total	1486,016	16			

ANOVA: Variância: % Rem DQO R<sup>2</sup> = 0,97351. Adj: 0,93946 (Fenton-fotocatalisado.sta) 3 fatores. 1 Bloco. 17 Runs. SM Erro puro = 0,46028. DV: %Rem DQO.

**Figura 1.** Diagrama de Pareto para remoção de DQO em efluente de laticínios**Figura 2.** Comparação das respostas previstas com as respostas observadas para aplicação do Fenton-fotocatalisado na % remoção de DQO

O modelo apresentado na Equação 3, mostra 97,35% do comportamento dos fatores estudados (R<sup>2</sup> = 0,9735), e confirma que o valor máximo explicável dos dados é de 93,94%, causado pela interferência do erro puro (0,460) que não apresentou significância estatística para o nível analisado.

Nas representações gráficas na Figura 3, estão expostas as superfícies de resposta e as correspondentes curvas de nível.

Através das análises da superfície de resposta e da curva de níveis que foram plotados em função da interação H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e Fe<sup>2+</sup>, é possível

observar que ocorre uma redução maior de DQO na faixa de 0,6 a 1,4 de concentração de sulfato ferroso e nos maiores valores trabalhados para o peróxido de hidrogênio.

### Efeito dos fatores adotados

#### Tempo de reação

O processo Foto-Fenton inclui três reações principais: geração de radicais •OH, oxidação da matéria orgânica e regeneração de íons de Fe<sup>2+</sup>. A etapa de geração do radical •OH é onde limita a reação. A oxidação da matéria orgânica é uma reação muito rápida, e boa parte é oxidada nos primeiros 10 min de reação. A regeneração dos íons de Fe<sup>2+</sup> é um processo mais longo podendo levar minutos ou horas.<sup>15</sup>

No presente estudo, foi considerado um intervalo de 34 a 85 min. A ANOVA sugere que o tempo de reação é um fator significativo nesta faixa. O aumento do tempo de reação aumentou a eficiência na remoção da DQO, o tempo ideal de reação foi atingido em 60 min, porém sua interação com as concentrações de Fe<sup>2+</sup> e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> não foi estatisticamente significativa (Figuras 3c-3f).

#### Concentração de Fe<sup>2+</sup>

Os íons de Fe<sup>2+</sup> agem como catalisadores para reduzir o peróxido de hidrogênio a •OH que oxida a matéria orgânica. A concentração desses íons é de grande importância em qualquer sistema Fenton. Kang *et al.*,<sup>16</sup> observaram que a oxidação da matéria orgânica tende a ser limitada pois o consumo de íons de Fe<sup>2+</sup> ocorre rapidamente durante o início da reação. Em contraste, se essa concentração for aumentada além de um nível ideal para eliminar os radicais •OH, pode diminuir a eficiência de remoção da DQO. Uma dosagem excessiva de ferro também pode aumentar os sólidos dissolvidos do efluente, o que vai exigir um tratamento adicional desse efluente.<sup>15</sup>

A influência da concentração de Fe<sup>2+</sup> na remoção de DQO é mostrada nas Figuras 3a-3d. Neste estudo a concentração variou de 0,015 até 1,25 mg L<sup>-1</sup>. A remoção de DQO do efluente de laticínio aumentou com o aumento da dosagem de sulfato de ferro até certo ponto, atingindo sua remoção máxima de DQO com a concentração de 0,625 mg L<sup>-1</sup>.

#### Concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

A influência da concentração de peróxido de hidrogênio na remoção da matéria orgânica foi um fator estatisticamente significativo no processo. Haber e Heiss,<sup>17</sup> concluíram que a reação

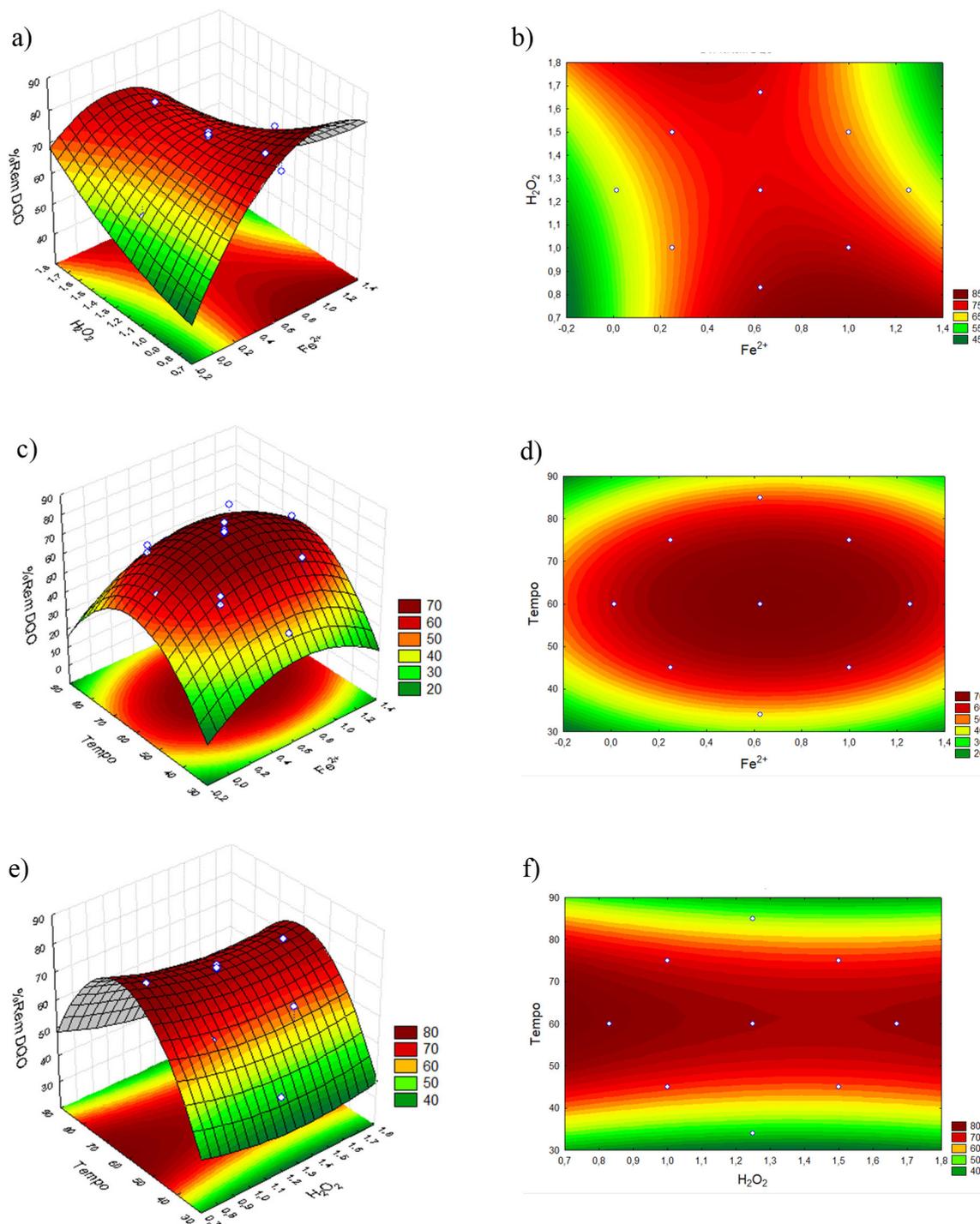


Figura 3. Superfície de resposta e curva de nível para redução de DQO via processo Fenton-fotocatalisado

entre  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$  é uma reação de segunda ordem em razões de  $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]$  inferior, mas é de ordem zero em razões superiores. No entanto esse fator não se aplica ao tratarmos efluentes de laticínios, por ser um efluente de composição variável. Além disso, um elevada concentração de  $\text{H}_2\text{O}_2$  leva a formação de bolhas e excesso de gás oxigênio que pode dificultar o processo de sedimentação.<sup>15</sup>

Neste estudo, essa concentração variou de 0,829 a 1,67 mL L<sup>-1</sup>, e a maior eficiência foi atingida na menor concentração de peróxido de hidrogênio, porém em dosagens maiores também foi obtido um grande porcentual de remoção de orgânicos, comprovado pela redução da taxa de DQO, numa faixa onde a concentração de  $\text{Fe}^{2+}$  está acima de 0,6 g L<sup>-1</sup>, contribuindo para a formação do radical como

mostram as Figuras 3a e 3b. A interação com o tempo não foi um fator estatisticamente significativo Figuras 3e e 3f. A concentração de  $\text{H}_2\text{O}_2$  teve uma influência pequena na remoção de DQO, como podemos observar na ANOVA (Tabela 4), onde o valor de p foi o mais próximo de 0,05.

#### Otimização do processo

A Figura 4 mostra os gráficos da função desejabilidade, que faz uma previsão estatística dos valores das variáveis independentes para se obter uma maior redução dos orgânicos presentes, para as faixas analisadas e para o modelo ajustado.

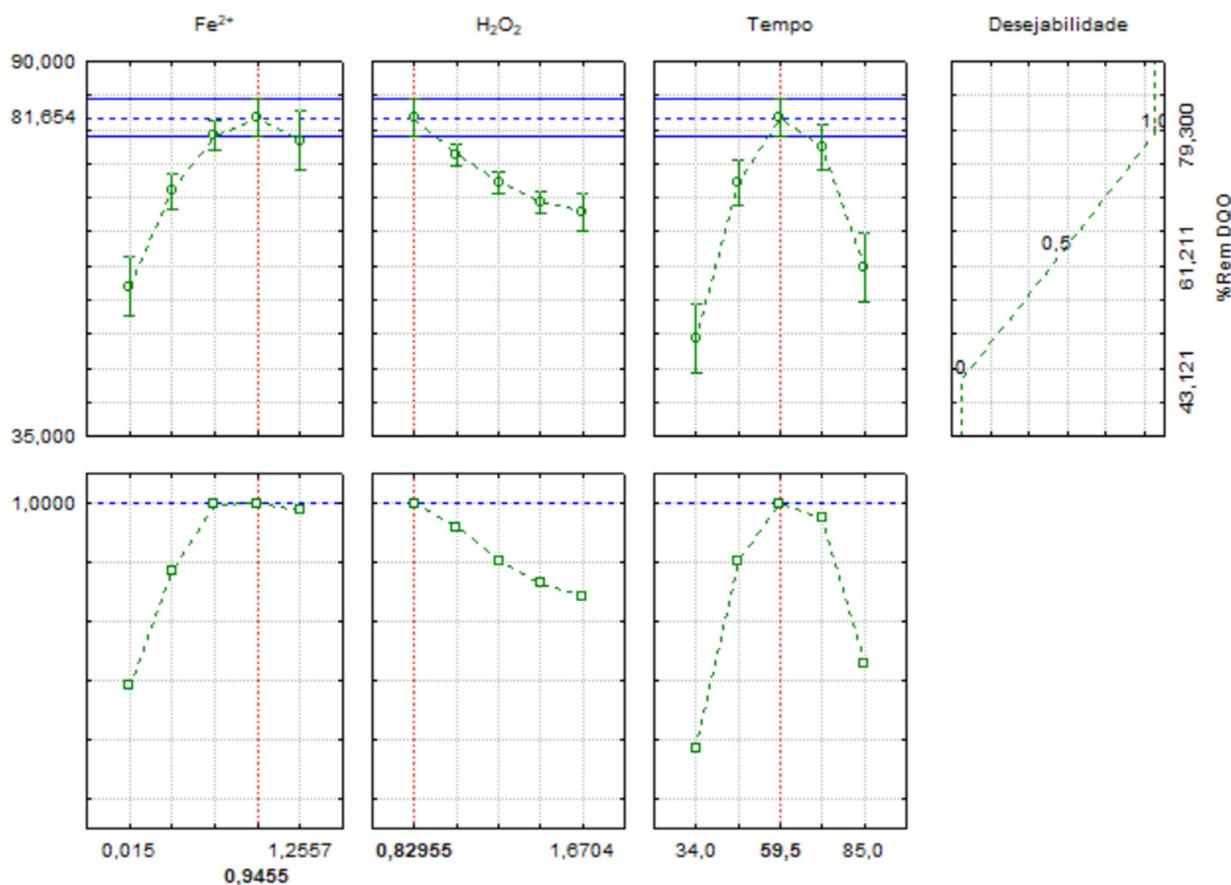


Figura 4. Perfil de valores previstos/otimizados e da função de desejabilidade para o planejamento composto central

Observa-se na Figura 4 as condições ótimas para uma remoção maior da concentração de orgânicos residuais, sendo eles: solução Fenton feita com concentrações de  $0,9455 \text{ g L}^{-1}$  e  $0,82955 \text{ mL L}^{-1}$  de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$ , respectivamente e tempo de agitação e exposição a luz solar de 59,5 min. A partir desses resultados podemos constatar que, a maior % de remoção de DQO atingida seria de 81,654%.

Comparando com o estudo desenvolvido por Martins<sup>18</sup> onde o autor otimizou o tratamento Fenton, aplicando em efluente da indústria cafeeira, constatou que uma solução feita a partir de  $200 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $5 \text{ mL L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{O}_2$  promoveria uma redução de 53,04% da concentração de DQO.

## CONCLUSÕES

Todas as variáveis analisadas demonstraram significância estatística dentro dos intervalos considerados, com as condições ideais para alcançar uma remoção superior a 79% situadas em 60 min de reação, uma concentração de  $0,625 \text{ g L}^{-1}$  de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $0,829 \text{ mL L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

A variável de tempo de reação exerceu a maior influência estatística no processo. Observou-se que, em tempos de reação de 34 e 85 min, o menor e o maior intervalo analisado, respectivamente, não demonstraram efeitos positivos no processo. O aumento da concentração de  $\text{Fe}^{2+}$  resultou em um incremento na porcentagem de remoção, embora a maior dosagem não tenha proporcionado benefícios adicionais ao processo. Por outro lado, a concentração de  $\text{H}_2\text{O}_2$  exibiu a menor influência na eficiência da remoção dos compostos orgânicos do efluente.

Com o propósito de aprimorar o tratamento, trabalhos adicionais estão em andamento com o objetivo de assegurar que o efluente final esteja em conformidade com os parâmetros estabelecidos na Norma CONAMA 430/11. A aplicação de tratamentos secundários aos

sugeridos neste trabalho são de grande importância, pois possibilitaria o reuso do efluente tratado.

Em suma, o processo Fenton-fotocatalisado se mostra como uma alternativa altamente eficaz para o tratamento de efluentes provenientes da indústria de laticínios.

## REFERÊNCIAS

1. Patrício, A. R.; Boas, R. M. R. P. V.; Galdino, M. T.; *Brazilian Journal of Development* **2021**, *7*, 37278. [Crossref]
2. Simensato, L. A.; Bueno, S. M.; *Revista Científica Unilago* **2019**, *1*, 1. [Link] acessado em Dezembro
3. Samal, K.; Dash, R. R.; Bhunia, P.; *Sci. Total Environ.* **2018**, *645*, 156. [Crossref]
4. Wang, Y.; Serventi, L.; *J. Cleaner Prod.* **2019**, *237*, 117821. [Crossref]
5. Figueiredo, T. C. F.; Souza, L.; Oliveira, R. B.; Santos, A. P. B.; *Blucher Chemistry Proceedings* **2015**, *3*, 10. [Crossref]
6. Casado, J.; *J. Environ. Chem. Eng.* **2019**, *7*, 102823. [Crossref]
7. Chen, L.; He, X. X.; Gong, Z. H.; Li, J. L.; Liao, Y.; Li, X. T.; Ma, J.; *Rare Met.* **2022**, *41*, 2429. [Link] acessado em Dezembro 2023
8. Ma, J.; Wang, K.; Wang, C.; Chen, X.; Zhu, W.; Zhu, G.; Yao, W.; Zhu, Y.; *Appl. Catal., B* **2020**, *276*, 119150. [Crossref]
9. *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater*, 23<sup>rd</sup> ed.; American Water Works Association: Washington, 2017.
10. Curbelo, F. S. D.; *Estudo da Remoção de Óleo em Águas Produzidas na Indústria de Petróleo, por Adsorção em Coluna Utilizando a Vermiculita Expandida e Hidrofobizada*; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2002. [Link] acessado em Dezembro 2023
11. *Statística*, version 7; StatSoft, Inc., Tulsa, USA, 2007.

12. Aguiar, A.; Ferraz, A.; Contreras, D.; Rodríguez, J.; *Quim. Nova* **2007**, *30*, 623. [Crossref]
13. Dias, F. F.; Silva, C. V. A.; Santos, A. F. M. S.; Andrade, J. G. P.; Albuquerque, I. L. T.; *Revista Geama* **2018**, *4*, 10. [Link] acessado em Dezembro 2023
14. Correa, C. Z.; Francisco, K.; Lopes, D. D.; Aliberti, E. A.; Prates, K. V. M. C.; *VII Simpósio de Bioquímica e Biotecnologia*, Londrina, Brasil, 2019. [Link] acessado em Dezembro 2023
15. Mahtab, M. S.; Islam, D. T.; Farooqi, I. H.; *Engineering Science and Technology, an International Journal* **2021**, *24*, 428. [Crossref]
16. Kang, N.; Lee, D. S.; Yoon, J.; *Chemosphere* **2002**, *47*, 915. [Crossref]
17. Haber, F.; Weiss, J.; *Proc. R. Soc. A* **1934**, *147*, 332. [Crossref]
18. Martins, T. D. O.; *Tratamento de Efluente da Indústria Cafeeira por Meio de Processos Oxidativos Avançados*; Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Brasil, 2018. [Link] acessado em Dezembro 2023