



ESTUDO DA CONFIGURAÇÃO ÓTIMA DE ELETRODOS UTILIZADOS EM PROCESSO DE ELETROFLOCULAÇÃO

STUDY OF THE OPTIMAL CONFIGURATION OF ELECTRODES USED IN THE ELECTROFLOCCULATION PROCESS

Patricia Lirian da Silva Prieto¹; Elves dos Santos Ferreira¹; Izabel Melz Fleck¹; Tiago Zoz¹; Leandro Fleck¹

Artigo recebido em: 07/06/2024 e aceito para publicação em: 29/09/2024.

DOI: <https://doi.org/10.14295/holos.v24i1.12509>

Resumo: O processamento da mandioca gera efluentes líquidos que demandam tratamentos, como exemplo, a eletrofloculação. Estudos que buscam a otimização do sistema eletroquímico são essenciais para a redução de custos, dentre os quais a distribuição do arranjo de eletrodos de sacrifício. Utilizou-se um reator de 1L, o qual comportou o efluente de fecularia e os eletrodos de alumínio. Cada ensaio experimental foi realizado com um novo conjunto de eletrodos e com o mesmo tempo de reação (17,5 minutos) e intensidade de corrente elétrica (1,05 A). Foram controlados os fatores espaçamento e tamanho dos eletrodos, sendo seus efeitos sobre a eficiência de remoção de cor e turbidez, avaliados utilizando-se um DCCR. Para cada variável resposta foi gerado um modelo matemático quadrático. As variáveis respostas foram avaliadas simultaneamente pela função de desejabilidade. Os modelos matemáticos para remoção de turbidez e cor foram estatisticamente significativos. O arranjo de eletrodos de sacrifício que resultaram na maior remoção de cor e turbidez simultaneamente foram com 6 cm de comprimento e espaçamento de 4 cm. Com base na otimização do sistema, a eficiência prevista para a remoção de turbidez foi de 75,55% e a remoção obtida em condições otimizadas foi de 78,12%, com erro de 3,29%. Para remoção de cor, observa-se que a eficiência prevista foi de 87,98% e a remoção obtida em condições otimizadas foi de 89,74%, com erro de 1,96%. Os resultados mostram que o espaçamento entre eletrodos e o tamanho destes devem ser considerados no planejamento de sistemas de tratamento eletroquímico em escala real.

Palavras-chave: Efluente líquido. Modelagem matemática. Otimização de processos.

Abstract: Cassava processing generates liquid effluents that require treatments, such as electroflocculation. Studies that seek to optimize the electrochemical system are essential for reducing costs, including the distribution of the sacrificial electrode arrangement. A 1L reactor was used, which contained the starch effluent and the aluminum electrodes. Each experimental test was carried out with a new set of electrodes and with the same reaction time (17.5 minutes) and electric current intensity (1.05 A). The factors spacing and size of the electrodes were controlled, and their effects on the color and turbidity removal efficiency were evaluated using a CCRD. For each response variable, a quadratic mathematical model was generated. The response

¹ Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul /UEMS. Mundo Novo, MS. E-mails: lirianmariano2012@gmail.com, elves.ferreira@hotmail.com, izabelmelz.melz@gmail.com, zoz@uems.br, fleckmissal@gmail.com

variables were evaluated simultaneously using the desirability function. The mathematical models for turbidity and color removal were statistically significant. The arrangement of sacrificial electrodes that resulted in the greatest removal of color and turbidity simultaneously were 6 cm long and spaced 4 cm. Based on system optimization, the predicted efficiency for turbidity removal was 75.55% and the removal obtained under optimized conditions was 78.12%, with an error of 3.29%. For color removal, it was observed that the predicted efficiency was 87.98% and the removal obtained under optimized conditions was 89.74%, with an error of 1.96%. The results show that the spacing between electrodes and their size must be considered when planning full-scale electrochemical treatment systems.

Keywords: Liquid effluent. Mathematical modeling. Process optimization.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alimentos, associada ao desenvolvimento industrial sem controle ambiental, resultou na degradação dos recursos ambientais em níveis preocupantes (Rodrigues *et al.*, 2019; Révillion *et al.*, 2020). No setor alimentício, observa-se a geração de resíduos considerados altamente impactantes aos recursos naturais, o que se deve principalmente à variabilidade de suas características físico-químicas. Dentre os resíduos gerados, os efluentes líquidos se destacam devido as elevadas concentrações de matéria orgânica, nutrientes, pH com características ácidas ou alcalinas, óleos, graxas e toxicidade (Oliveira *et al.*, 2019).

Em fecularias, durante o processamento das raízes de mandioca, ocorre a geração de um efluente líquido caracterizado pelo elevado potencial poluidor devido ao baixo pH, elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, além da presença de elementos tóxicos (Costa *et al.*, 2022).

Para que possa ser lançado em um curso hídrico receptor, um efluente líquido deve passar pelo tratamento prévio, seja em condições químicas, físicas ou biológicas. Comumente, em grande escala tem-se empregado tratamentos convencionais como a biodigestão anaeróbia (em associação a fins energéticos), nitrificação e desnitrificação (Ho; Goethals, 2020). Entretanto, a realidade atual mostra a necessidade crescente pela busca de sistemas alternativos de tratamento, dentre os quais se destaca a eletrofloculação.

A eletrofloculação consiste em um processo onde ocorre a geração de coagulantes *in situ* a partir da utilização de eletrodos metálicos submetidos a ação de uma determinada corrente elétrica (Cunha *et al.*, 2022). De acordo com Paschoal e Tremiliosi-Filho (2005) a eletrofloculação pode ser entendida como um processo eletroquímico baseado na geração de pequenas bolhas de O₂ e H₂, as quais substituem a adição de floculantes. As principais etapas do processo são: a) geração das bolhas de gás, b) contato das bolhas com as partículas em suspensão no efluente líquido, c) adsorção das bolhas de gás na superfície

das partículas, d) ascensão do conjunto partículas/bolhas para a superfície, o que resulta no clareamento do líquido tratado.

Neste contexto, Aquino Neto *et al.* (2011) salientam que a eletrofloculação possui a capacidade de desestabilizar poluentes emulsificados ou em suspensão, em meio aquoso, considerando três etapas distintas:

1) Em um primeiro momento o coagulante é gerado *in situ* pela oxidação de um ânodo metálico de sacrifício. Paralelamente, ocorre a eletrólise da água e a formação de microbolhas de oxigênio (ânodo) e hidrogênio (cátodo), as quais carregarão o material floculado para a superfície do reservatório líquido. As reações que ocorrem no ânodo e no cátodo são apresentadas nas Equações 1, 2 e 3, 4, respectivamente.



2) Posteriormente, os hidróxidos adsorvem-se em partículas coloidais originando os flóculos.

3) Na última etapa, devido a formação de microbolhas resultantes do processo de eletrólise, ocorre o processo de flotação.

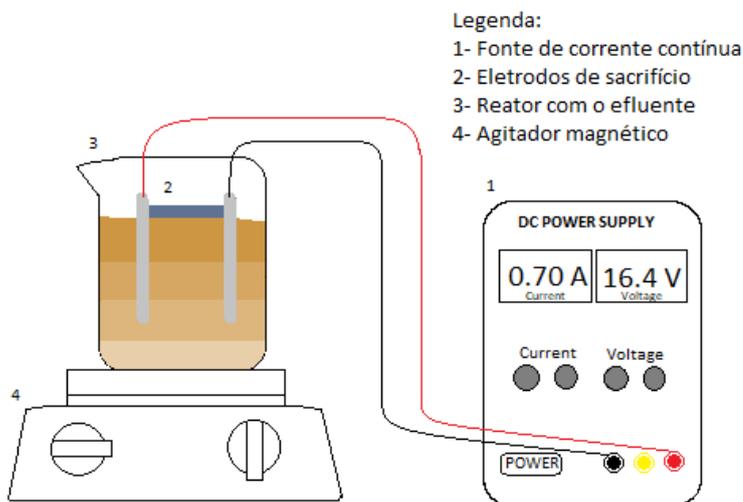
Um dos grandes desafios atuais é a comprovação da viabilidade econômica da aplicação do tratamento eletroquímico (Vieira; Cavalcanti, 2018), em que estudos que objetivam otimizar o sistema são essenciais à redução de custos. Neste contexto, o presente trabalho se baseia na hipótese de que diferentes configurações de tamanho dos eletrodos de sacrifício e o espaçamento entre estes, podem influenciar significativamente na eficiência do sistema de tratamento eletroquímico da água residuária proveniente do processamento da mandioca.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Modulo experimental

O sistema alvo da pesquisa consistiu em um reator operando em sistema de batelada. Utilizou-se um reservatório de 1 L, em vidro, o qual comportou o efluente líquido a ser tratado eletroquimicamente e os eletrodos de sacrifício de alumínio, os quais foram conectados a uma fonte de corrente contínua, sendo separados entre si com o auxílio de um material isolante (Figura 1).

Figura 1- Módulo experimental



Para garantir condições de homogeneidade e contato uniforme do efluente com os eletrodos de sacrifício, o sistema foi operado sob condições de agitação constante, com o auxílio de um agitador magnético. Adicionalmente, cada ensaio experimental foi realizado com um novo conjunto de eletrodos e com o mesmo tempo de reação (17,5 minutos) e intensidade de corrente elétrica (1,05 A), condições estas definidas com base em estudos preliminares (Fabricio, 2020). A utilização de eletrodos novos em todos os ensaios experimentais garantiu que a possível degradação dos mesmos não influenciasse na eficiência do sistema e nas conclusões finais do estudo.

Após cada ensaio experimental, o efluente líquido permaneceu em repouso, em bancada, por 30 minutos, para a flotação/sedimentação de todas as partículas dispersas na massa líquida. Transcorrido esse período, a retirada das amostras para a realização das

análises físico-químicas ocorreu no centro do reator, com o auxílio de uma mangueira plástica adaptada a uma seringa de sucção.

2.2 Coleta da água residuária

O efluente líquido foi coletado em uma fecularia localizada no Estado de Mato Grosso do Sul, na região Cone-Sul. A fim de remover sólidos suspensos grosseiros presentes no efluente líquido, foi realizada uma filtragem prévia à condução dos ensaios experimentais. A coleta do efluente ocorreu em um único dia a fim de garantir condições de homogeneidade das amostras utilizadas em cada ensaio experimental. Adicionalmente, visando evitar alteração das características físicas, químicas e biológicas do efluente, este foi mantido sob refrigeração, a -5 °C, até o momento do uso.

2.3 Delineamento de tratamentos

Foram controlados os fatores espaçamento entre eletrodos (cm) e tamanho dos eletrodos (cm), sendo seus efeitos sobre a eficiência de remoção de cor e turbidez, avaliados utilizando-se um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), ou seja, um esquema fatorial de tratamentos 2², incluindo 4 ensaios fatoriais, 4 ensaios axiais e 4 repetições no ponto central, totalizando 12 ensaios (Tabela 1).

Tabela 1- Delineamento de tratamentos e área total dos eletrodos de sacrifício.

Ensaio	Tamanho dos Eletrodos (valor real/cm)	Espaçamento entre eletrodos (valor real/cm)	Área total dos eletrodos (cm ²)	Relação área/volume (m ² L ⁻¹)
1	3,17	1,87	38,04	0,003804
2	8,83	1,87	105,96	0,010596
3	3,17	6,12	38,04	0,003804
4	8,83	6,12	105,96	0,010596
5	2,00	4,00	24,00	0,002400
6	10,00	4,00	120,00	0,012000
7	6,00	1,00	72,00	0,072000
8	6,00	7,00	72,00	0,072000
9	6,00	4,00	72,00	0,072000
10	6,00	4,00	72,00	0,072000
11	6,00	4,00	72,00	0,072000
12	6,00	4,00	72,00	0,072000

Todos os eletrodos de sacrifício tiveram largura fixada em 6 cm, sendo considerado como tamanho no delineamento de tratamentos, apenas o comprimento dos eletrodos. Desta forma, a área total dos eletrodos imersos no efluente de fecularia, considerando que

o arranjo é projetado com dois eletrodos por ensaio eletroquímico, ficou definido conforme apresentado na Tabela 1.

Considerando que a eletrofloculação é dependente da condutividade elétrica do efluente (Huangfu *et al.*, 2021), está foi ajustada antes de cada ensaio experimental para 2,5 Ω/cm , a fim de garantir a eficiência do sistema. Para isso, foram adicionadas diferentes concentrações de Cloreto de Sódio (NaCl), conforme necessidade. A análise de eficiência do sistema em termos de remoção de cor e turbidez foi avaliada com base em APHA (2012) e turbidímetro digital de bancada (modelo TU430), respectivamente.

Optou-se por conduzir o estudo avaliando os parâmetros cor e turbidez, por entender que a remoção destes, resulta concomitantemente na remoção de outros parâmetros essenciais ao monitoramento da eficiência do sistema de tratamentos de efluentes, a citar as concentrações de sólidos, matéria orgânica e nutrientes.

2.4 Modelagem matemática do sistema de tratamento

Para cada variável resposta foi gerado um modelo matemático quadrático representativo do processo, obtido a partir do ajuste estatístico dos resultados correspondentes a todos os ensaios do delineamento de tratamentos (DCCR). O modelo matemático codificado que foi ajustado a partir dos dados experimentais, é apresentado na Equação 5.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + e \quad (5)$$

Em que:

y - variável resposta; β - coeficientes de regressão; x1 - valor codificado do inóculo do biodigestor; x2 - valor codificado do inoculante comercial; e – erro.

Para avaliar as variáveis respostas simultaneamente e encontrar os valores operacionais ótimos das variáveis independentes controladas no sistema, foi utilizada a técnica da função de desejabilidade proposta por Derringer e Suich (1980).

A significância estatística dos modelos matemáticos originados no sistema foi testada pela Análise de Variância (ANOVA) com um intervalo de confiança de 95%, sendo posteriormente validados com base em dados de eficiência de remoção de cor e turbidez, obtidas em um ensaio experimental de validação conduzido em condições experimentais

dentro dos limites em que foram gerados, considerando os valores ótimos obtidos pela aplicação da função de desejabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Eficiência de remoção de turbidez

De acordo com Von Sperling (2014) a turbidez representa o grau de interferência com a passagem da luz através da água, conferindo uma aparência turva à mesma, podendo ter origem antropogênica, devido a despejos domésticos e industriais.

No presente estudo, a maior remoção de turbidez ocorreu no ponto central do delineamento de tratamentos ($T_e = 6,00$ cm e $E_e = 4,00$ cm). Contudo, dos quatro ensaios do ponto central, devido a discrepância observada para a análise estatística, os resultados de um (1) ensaio foi removido da matriz do delineamento de tratamentos. O delineamento utilizando quatro repetições no ponto central permite tal liberdade, sendo recomendado o mínimo de três repetições (Rodrigues; lemma, 2014). A menor remoção observada foi de 34,88%, sendo operado com 6,00 cm do T_e e 1,00 cm de E_e . Por outro lado, as maiores remoções de turbidez variaram de 77,09% a 77,43%, quando o reator eletroquímico operou com eletrodos de 6,00 cm, espaçados por 4,00 cm (Tabela 2).

Comparativamente ao presente estudo, Cominote et al. (2020) ao avaliarem a eficiência do tratamento por eletrofloculação com monitoramento e controle automático de um efluente de indústria têxtil, constataram que a melhor remoção de turbidez ocorreu nas condições de 2A e 10 min de operação, com eficiência média acima de 70%. Vale ressaltar, que no presente estudo foram empregadas as condições de 1,05 A e 17,5 min, condições experimentais que resultam em eficiência de tratamento similar aos apresentados por Cominote et al. (2020). Entretanto, não há como afirmar qual dos estudos é mais viável economicamente sem a realização de estudos adicionais.

Tabela 2 - Eficiência de remoção de turbidez no processo de eletrofloculação

Tamanho dos Eletrodos (Te)		Espaçamento Entre os Eletrodos (Ee)		Remoção (%)
Codificado	Real (cm)	Codificado	Real (cm)	
-1	3,17	-1	1,87	66,70
+1	8,83	-1	1,87	60,38
-1	3,17	+1	6,12	48,31
+1	8,83	+1	6,12	54,97
-1,41	2,00	0	4,00	56,66
+1,41	10,00	0	4,00	64,22
0	6,00	-1,41	1,00	34,88
0	6,00	+1,41	7,00	38,37
0	6,00	0	4,00	77,09
0	6,00	0	4,00	72,23
0	6,00	0	4,00	77,43

3.2 Análise de efeitos para a remoção de turbidez

Em relação aos efeitos dos fatores sobre a remoção de turbidez, o termo quadrático do espaçamento entre os eletrodos influenciou significativamente nos resultados, uma vez que o p-valor (0,003318) obtido foi inferior ao nível de significância adotado, de 95%. O efeito de um fator pode ser entendido como a variação causada na resposta, quando percorremos todos os níveis desse fator, independentemente dos demais fatores (Rodrigues; lemma, 2014).

O espaçamento entre os eletrodos (termos lineares e quadráticos) e o tamanho dos eletrodos (termo quadrático) influenciaram de forma negativa sobre a remoção de turbidez, ou seja, ficou definido pelo estudo que, quando se aumenta os níveis de distância ou do tamanho dos eletrodos, se tem menor eficiência sobre a remoção de turbidez. Contudo, o tamanho do eletrodo (termo linear) e a interação entre as variáveis independentes apresentaram efeitos positivos, porém, não foram significativos.

3.3 Modelagem matemática para a remoção de turbidez

O modelo representativo do processo obtido através das respostas está representado pela Equação 6. Os coeficientes foram estimados com base na análise de regressão linear múltipla, utilizando o método dos mínimos quadrados. Fleck *et al.* (2013), sugerem que a modelagem matemática possibilita a geração de cenários futuros, sendo está uma importante ferramenta para a tomada de decisões por parte dos gestores responsáveis pelo setor ambiental de uma empresa como, por exemplo, uma fecularia (alvo do presente estudo).

$$RT (\%) = 75,5468 + 1,37905T_e - 5,28005T_e^2 - 2,36695E_e - 17,2588E_e^2 + 3,245T_eE_e \quad (6)$$

Em que:

RT(%)= eficiência de remoção de turbidez.

T_e = valor codificado do tamanho dos eletrodos.

E_e = valor codificado do espaçamento entre os eletrodos.

3.4 Análise de Variância para remoção de turbidez

Os resultados obtidos para eficiência de remoção de turbidez foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA), a qual de acordo com Stochero et al. (2020), consiste em um procedimento estatístico utilizado para verificar a existência de diferença significativa entre as médias dos tratamentos realizados em um estudo.

No presente estudo, apenas o termo quadrático do espaçamento entre os eletrodos influenciou significativamente para a remoção da turbidez no processo de eletrofloculação da água residuária de fécula de mandioca, com p-valor de 0,003318, sendo que os demais tratamentos não atingiram o nível de significância adotado, de 95%.

Na Tabela 3 é apresentada a ANOVA para a validação estatística do modelo matemático. Verifica-se que o p-valor de 0,00014 foi significativo, sendo menor que o nível de confiança adotado, o qual confirma a validade estatística do modelo matemático gerado e a possibilidade de aplicação da equação matemática para a simulação de cenários futuros. Corroborando com a robustez deste resultado, Abaurrea et al. (2014) afirmam que a validação de um modelo matemático possibilita verificar se os pressupostos do modelo estão corretos, pois do contrário, as conclusões obtidas não seriam aceitas.

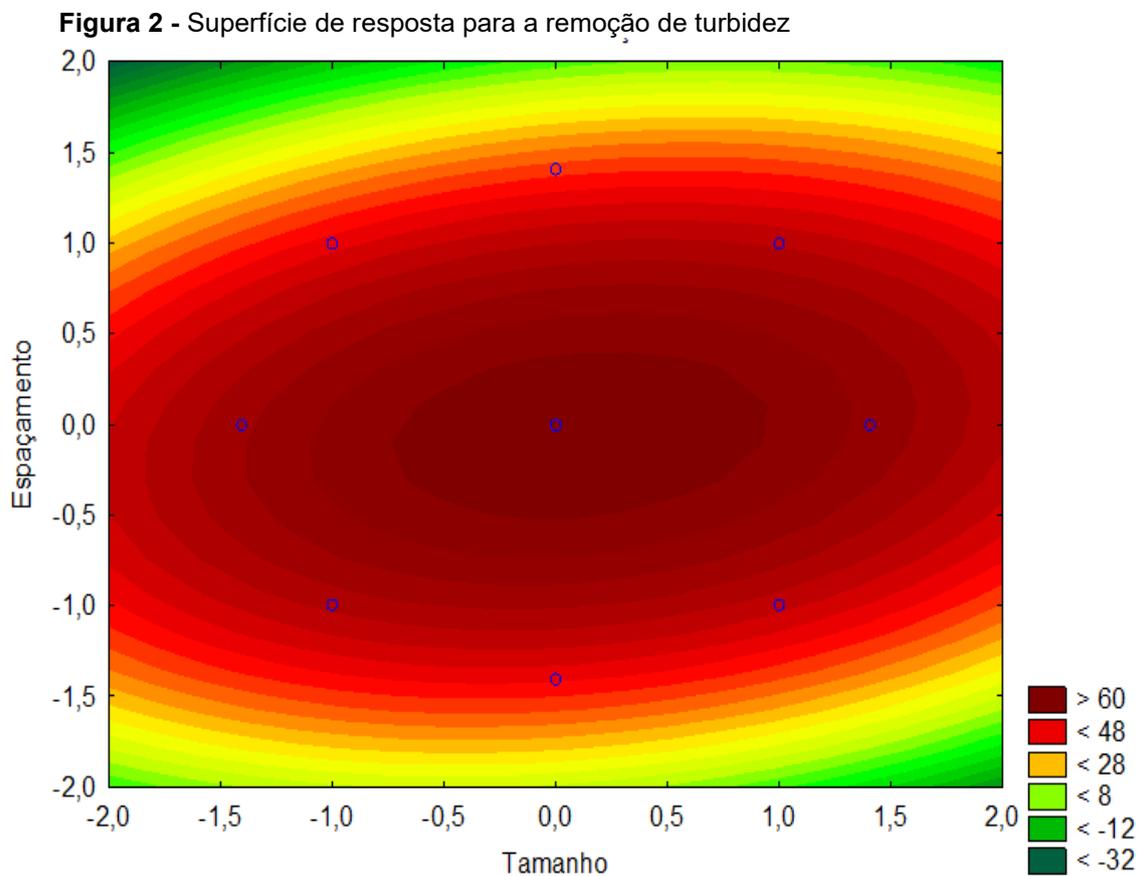
Tabela 3 - Validade estatística do modelo matemático para remoção de Turbidez

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	p-valor
Regressão	1770,943	5	385,3454	0,000014*
Resíduos	302,353	5	60,471	
Total	2073,296	10		

* Estaticamente significativo (95%); $R^2=85,41$.

Embora o modelo matemático proposto explique 85,41% da variabilidade dos dados experimentais, torna-se importante evidenciar a dinâmica do processo com base na faixa do estudo. Com isso, é apresentado o gráfico de superfície de resposta do modelo

matemático proposto (Figura 2). Conforme observado, ocorre a maior remoção de turbidez quando o sistema de tratamento eletroquímico é operado nas condições do ponto central (6 cm para tamanho dos eletrodos de sacrifício, os quais devem estar distanciados em 4 cm por isolante plástico).



3.5 Análise de eficiência de remoção de cor

A cor é o parâmetro físico responsável pela coloração de uma amostra líquida, sendo resultado da concentração de sólidos dissolvidos (Von Sperling, 2014). No presente estudo, para a remoção de cor os melhores resultados foram obtidos com eletrodos de 6 cm de tamanho, espaçados entre si por 4 cm, variando o percentual de remoção de 88,45% e 89,02%. Os menores valores encontrados foram nas condições com termos axiais dos espaçamentos entre os eletrodos, sendo estes de 1 cm e 7 cm, em que o percentual de remoção de cor foi de 55,47% e 59,20% (Tabela 4).

Desenvolvendo estudo similar, Algeri *et al.* (2018) constaram que, quando o processo de eletrofloculação é operado de 47 a 51 minutos e amperagem de 360 A m⁻² a 440 A m⁻² é

possível obter entre 70 e 80% de eficiência na remoção de cor de efluente sintético à base de corante vermelho reativo, valores estes parecidos aos obtidos no presente estudo.

Tabela 4 - Eficiência de remoção de cor

Tamanho dos Eletrodos		Espaçamento Entre os Eletrodos		Remoção de cor (%)
Codificado	Real (cm)	Codificado	Real (cm)	
-1	3,17	-1	1,87	73,56
+1	8,83	-1	1,87	71,12
-1	3,17	+1	6,12	65,33
+1	8,83	+1	6,12	69,98
-1,41	2,00	0	4,00	70,46
+1,41	10,00	0	4,00	72,31
0	6,00	-1,41	1,00	55,47
0	6,00	+1,41	7,00	59,20
0	6,00	0	4,00	88,45
0	6,00	0	4,00	86,54
0	6,00	0	4,00	89,02

As similaridades observadas nas repetições do ponto central proporcionam um entendimento prévio sobre as condições experimentais, com resultados robustos e confiáveis (Rodrigues; lemma, 2014). Para garantir a confiabilidade estatísticas dos dados experimentais, foi retirado um ensaio experimental do ponto central, devido a este apresentar-se discrepante em relação às demais repetições, o que não inviabiliza as análises realizadas.

Os termos quadráticos do tamanho e espaçamento entre os eletrodos apresentaram efeitos negativos significativos, pois ambos obtiveram p-valor inferior ao nível de significância adotado neste estudo ($p < 0,05$), sendo estes de 0,013817 e 0,000659, respectivamente. Em termos práticos, os resultados revelaram que o aumento do tamanho e espaçamento dos eletrodos de sacrifício, podem reduzir a eficiência do tratamento eletroquímico, quando o parâmetro de análise considerado for a cor.

3.6 Modelagem matemática para a remoção de cor

O modelo matemático proposto que representa o processo de remoção de cor é apresentado pela Equação 7. Os coeficientes foram estimados com base na análise de regressão linear múltipla, utilizando o método dos mínimos quadrados. O modelo matemático gerado se mostra de fundamental importância para a simulação de cenários futuros, conforme descrito pelos pesquisadores Fleck *et al.* (2013).

$$RC (\%) = 87,9804 + 0,6041T_e - 6,89405T_e^2 - 0,51535E_e - 27,9222E_e^2 + 1,7725T_eE_e \quad (7)$$

Em que:

RC(%)= eficiência de remoção de turbidez.

T_e= valor codificado do tamanho dos eletrodos.

E_e= valor codificado do espaçamento entre os eletrodos.

3.7 Análise de Variância para a remoção de cor

Os termos quadráticos do espaçamento e tamanho dos eletrodos de sacrifício influenciaram de forma significativa para a remoção da cor no processo de eletrofloculação da água residuária da produção de fécula de mandioca, apresentando p-valor de 0,000659 e 0,013817, respectivamente.

Outro ponto que merece destaque é o coeficiente de determinação (R²), sendo que o modelo proposto explica 92,30% dos dados experimentais. Em se tratando da aplicação prática, entende-se que o modelo matemático poderá ser utilizado para especulação de cenários futuros de remoção de cor no processo de eletrofloculação de águas residuais de fécula de mandioca. Corroborando com o R², a validação estatística do modelo matemático é comprovado pelo p-valor de 3,753 x 10⁻⁷, inferior ao nível de significância, de 95% (Tabela 5).

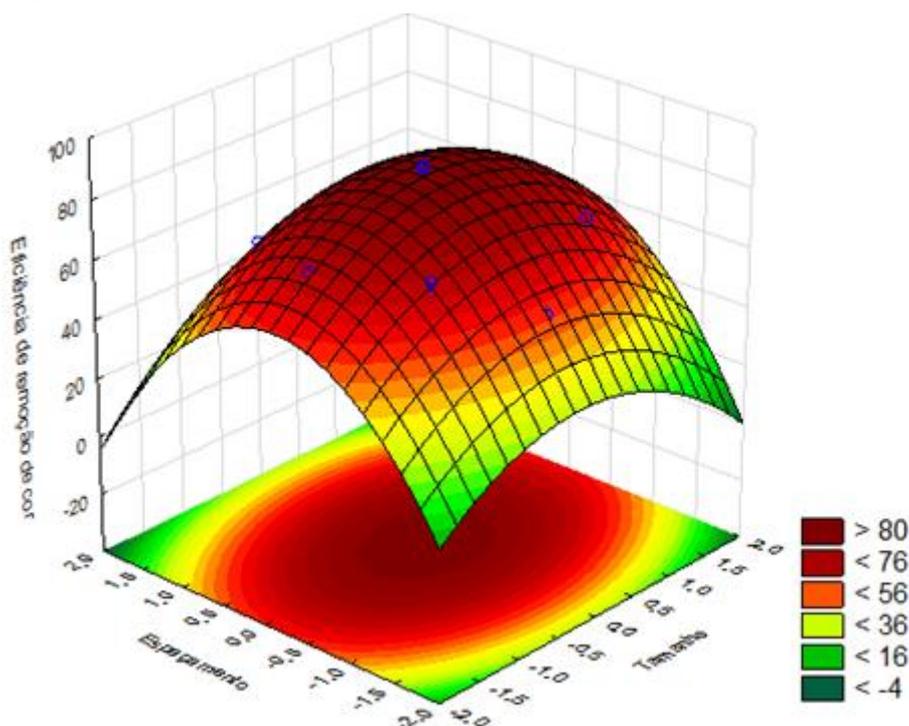
Tabela 5 - Validade estatística do modelo matemático proposto para remoção de cor

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	p-valor
Regressão	1158,342	5	274,61362	3,753 x 10 ⁻⁷
Resíduos	96,577	5	96,577	
Total	1254,919	10		

* Estaticamente significativo (95%); R²=92,30.

Na Figura 3 é apresentado o gráfico de superfície de resposta representativo do modelo matemático proposto pela regressão sobre a eficiência da remoção da cor do efluente de fecularia. Conforme pode ser observado, as condições ideais para arranjo e distribuição dos eletrodos de sacrifício estão situadas no ponto central do delineamento de tratamentos, a exemplo do que foi obtido para o parâmetro turbidez, o que evidência que a faixa operacional estudada possibilitou a otimização matemática do sistema proposto.

Figura 3- Superfície de resposta para eficiência de remoção de cor

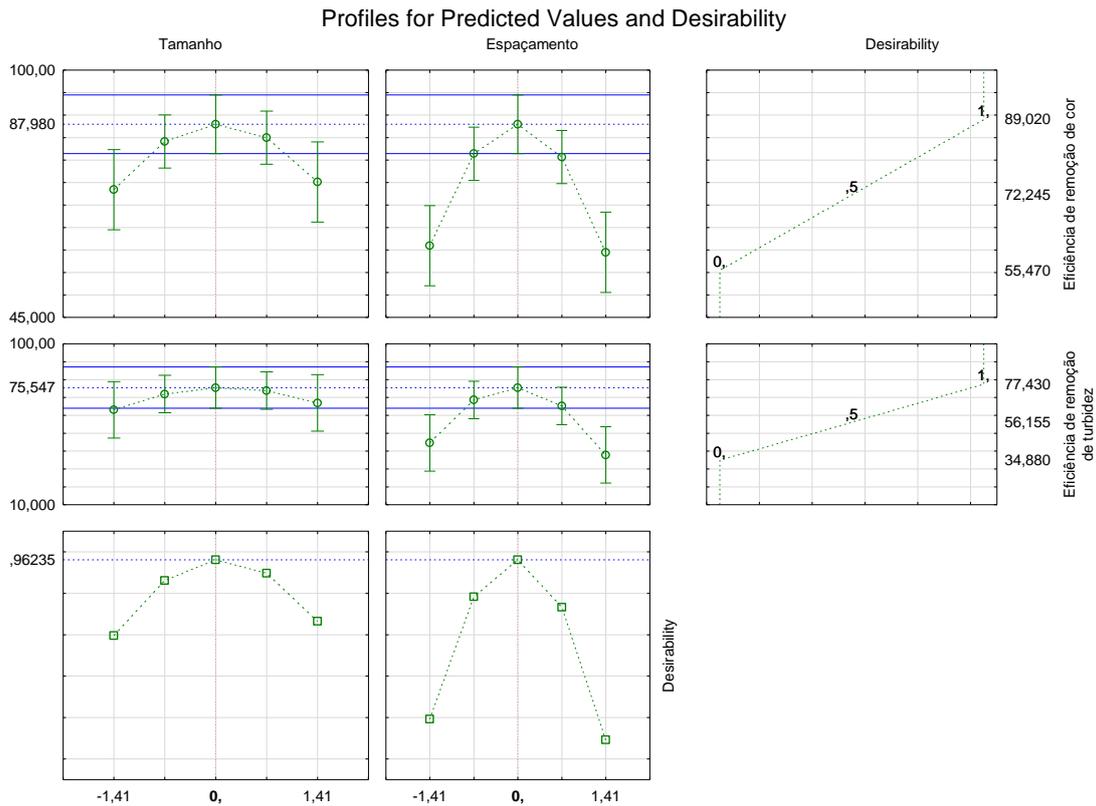


3.8 Função de desejabilidade e validação experimental do modelo gerado

Utilizando a abordagem da função de desejabilidade proposta por Derringer & Suich (1980), foi possível avaliar as variáveis respostas simultaneamente para encontrar valores operacionais ótimos para os fatores em estudo. O arranjo de eletrodos de sacrifício que resultaram na maior remoção de cor e turbidez simultaneamente foram com 6 cm de comprimento (equivalente a área total de 72 cm² dispersos no efluente líquido), espaçados 4 cm entre si por isolante plástico (Figura 4).

Com base na otimização do sistema, a eficiência prevista para a remoção de turbidez foi de 75,55% e a remoção obtida em condições otimizadas foi de 78,12%, com erro de 3,29%. Já para remoção de cor, observa-se que a eficiência prevista foi de 87,98% e a remoção obtida em condições otimizadas foi de 89,74%, com erro de 1,96%. Tais resultados comprovaram experimentalmente a validade dos modelos matemáticos oriundos do presente estudo para a simulação de cenários futuros no campo da eletrofloculação.

Figura 4- Aplicação da função de desejabilidade.



4 CONCLUSÕES

A eletrofloculação apresenta resultados promissores para o tratamento de efluentes líquidos e se destaca pelo caráter inovador, considerando a limitação de estudos que aplicaram eletrofloculação para o tratamento de efluente de fecularia. Os resultados da pesquisa realizada comprovaram cientificamente a hipótese de que o espaçamento entre os eletrodos de sacrifício e o tamanho destes influenciam significativamente no sistema de tratamento de efluentes, e, sugere-se que estes resultados sejam considerados por empreendedores adeptos a tecnologia no planejamento de sistemas de tratamento eletroquímico em escala real como forma de otimizar o processo, manter eficiência e reduzir os custos operacionais.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela disponibilização de bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- ABAURREA, J.; ASÍN, J.; CEBRIÁN, A. C.; GARCIA-VERA, M. A. Trend analysis of water quality series based on regression models with correlated errors. **Journal of Hydrology**, v. 400, n. 3-4, p. 341-352, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.049>
- ALGERI, A.; LUCHESE, A. V.; MORINI, P. M.; SEHN, E. Aplicação da técnica de eletrocoagulação para a remoção da corante têxtil. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 19, n. 2, p. 31-39, 2018. <https://doi.org/10.7867/1983-1501.2017v19n2p31-39>
- APHA- **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 22. ed. Washinton, DC – EUA, 2012.
- COMINOTE, M.; SILVA, G. L.; HERINGER, N. M. F.; GAZEL, F.; OLIVEIRA, R. C. Z. Avaliação de tratamento de efluente têxtil por eletrofloculação com monitoramento e controle automático considerando estudo de viabilidade de uso de geração fotovoltaica. **Periódico Tchê Química**, v.17, n.35, p.507-523, 2020. <https://doi.org/10.52571/PTQ.v17.n35.2020.43> COMINOTE pgs 507 523.pdf
- COSTA, R. C.; RAMOS, M. D. N.; FLECK, L.; GOMES, S. D.; AGUIAR, A. Critical analysis and predictive models using the physicochemical characteristics of cassava processing wastewater generated in Brazil. **Journal of Water Process Engineering**, v. 47, p. 102629, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102629>
- CUNHA, F. A. P.; SABINO, J. B.; MACHADO, V. T.; SILVA, E. V.; SILVA, M. B. Estudo da viabilidade econômica da eletrofloculação na recuperação de efluentes de máquinas de lavar roupas domésticas. **Concilium**, v. 22, n. 4, p. 216-229, 2022. <https://doi.org/10.53660/CLM-330-335>
- DERRINGER G. C.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several responses variables. **Journal of Quality Technology**, Milwaukee, v. 12, n. 4, p. 214-219, 1980. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>
- FABRICIO, G. A. Z. **Aplicação da técnica de eletrofloculação para o tratamento da água residuária proveniente da produção de fécula de mandioca**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental. Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, 2020. https://portal.uems.br/assets/uploads/biblioteca/2021-06-10_16-39-18.pdf
- FLECK, L.; TAVARES, M.; H.; F.; EYNG, E. Principais modelos matemáticos de qualidade da água e suas aplicações: uma revisão. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v.1, n.7, p.46-61, 2013. <https://periodicos.utfpr.edu.br/recit/article/view/4206/pdf>
- HUANGFU, Z.; ZHANG, W.; HAO, S.; ZHANG, M.; YAO, F. Construction of novel electrochemical treatment systems for indigo wastewater and their performance. **Pigment & Resin Technology**, v.50, n.3, p. 264-270, 2021. <https://doi.org/10.1108/PRT-07-2020-0068>
- HO, L.; GOETHALS, P. L. M. Municipal wastewater treatment with pond technology: Historical review and future outlook. **Ecological Engineering**, v. 148, p. 105791, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105791>
- OLIVEIRA, L. G.; FERNENDES, F. H.; MESQUITA, W. D.; JUNIOR, M. G.; SANTOS, M. R. C.; GURGEL, M. F. C. Uma revisão do uso de processos oxidativos avançados para descoloração de

águas residuais de efluentes. **Revista Processos Químicos**, v. 13, n. 26, p. 105-112, 2019. <https://doi.org/10.19142/rpq.v13i26.546>

PASCHOAL, F. M. M.; TREMILIOSI-FILHO, G. Aplicação da técnica de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais. **Química Nova**, v. 28, n.5, p.766-772, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000500006>

RÉVILLION, J. P.; KAPP, C.; BADEJO, M. S.; DIAS, V. V. O mercado de alimentos vegetarianos e veganos: características e perspectivas. **Caderno de Ciência & Tecnologia**, v.37, n.1, p. 1-10, 2020. <http://dx.doi.org/10.35977/0104-1096.cct2020.v37.26603>

RODRIGUES, M. R.; IEMMA, A. F. **Experimental design and process optimization**. 2^a ed. São Paulo: 2014.

RODRIGUES, S. C. M.; DIAS, L. A. L.; CARVALHO, A. C.; FENZL, N.; LOPES, L. O. C. Os recursos naturais no processo de desenvolvimento econômico capitalista. **Semioses**, v. 13, n. 4, p. 50-68, 2019. <https://doi.org/10.15202/1981996x.2019v13n4p50>

STOCHERO, E. L. M.; JACOBI, L. F.; LÚCIO, A. D. Imputação de dados na análise de variância em experimentos no Delineamento Inteiramente Casualizado. **Ciência e Natura**, v.42, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.5902/2179460X40447>

VIEIRA, S. P.; CAVALCANTI, L. A. P. Construção de protótipo de eletrofloculação em fluxo contínuo alimentado por energia solar fotovoltaica para purificação de efluentes. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 5, n. 9, p. 181-190, 2018. <https://doi.org/10.21438/rbgas.050912>

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.