

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL
UNIDADE UNIVERSITÁRIA DE MUNDO NOVO
TECNOLOGIA EM GESTÃO AMBIENTAL

GEISI APARECIDA ZANG FABRICIO

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ELETROFLOCULAÇÃO
PARA O TRATAMENTO DA ÁGUA RESIDUÁRIA
PROVENIENTE DA PRODUÇÃO DE FÉCULA DE
MANDIOCA**

Mundo Novo – MS

Dezembro/2020

GEISI APARECIDA ZANG FABRICIO

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ELETROFLOCULAÇÃO
PARA O TRATAMENTO DA ÁGUA RESIDUÁRIA
PROVENIENTE DA PRODUÇÃO DE FÉCULA DE
MANDIOCA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Tecnologia em Gestão Ambiental da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Tecnólogo em Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Fleck

Coorientador: Prof. Dr. Leandro Marciano Marra

Mundo Novo – MS

Dezembro/2020

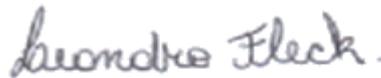
GEISI APARECIDA ZANG FABRICIO

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ELETROFLOCULAÇÃO
PARA O TRATAMENTO DA ÁGUA RESIDUÁRIA
PROVENIENTE DA PRODUÇÃO DE FÉCULA DE
MANDIOCA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Tecnologia em Gestão Ambiental da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do grau Tecnólogo em Gestão Ambiental.

APROVADO EM 09 de dezembro de 2020

Participação remota por vídeo conferência
Prof. Dr. Leandro Fleck - Orientador – UEMS



Participação remota por vídeo conferência
Prof. Dr. Jean Sérgio Rosset – UEMS



Participação remota por vídeo conferência
Ivan Carlos Klaus- Amigos Mundo Novo



* Participação por vídeo conferência de acordo com a INSTRUÇÃO NORMATIVA PROPP/UEMS Nº 001, de 07 de maio de 2019, Portaria UEMS N.º 018, de 16 de março de 2020 para enfrentamento à COVID

*Dedico este trabalho principalmente à Deus,
minha família, em especial minha mãe Gelci, e a
todos que permaneceram ao meu lado
acreditando em mim.*

AGRADECIMENTOS

Durante toda a vida, principalmente durante o período acadêmico, precisamos de forças e incentivos que nos fazem continuar com nossos sonhos e objetivos, tornando-os mais fortes, através da luta para conquistá-los e transformá-los em realidade. Durante a caminhada acadêmica, encontramos pessoas que, de qualquer forma, nos dão apoio e forças para não desistir, o que nos remete a seguinte frase “ninguém vence uma batalha sozinho”. É justamente pensando nessas pessoas que escrevo meus mais sinceros agradecimentos, pois não chegaria onde cheguei sem cada uma delas.

Agradeço a Deus, por estar comigo em toda essa jornada e em todos os momentos da minha vida, sempre escutando minhas orações, me ouvindo em momentos difíceis, cuidando de mim e me dando forças para continuar.

Agradeço a minha preciosa mãe Gelci Zang, da forma mais pura e sincera que pode existir, a qual foi e é, minha maior incentivadora e fonte de inspiração. Me criou sempre com muito zelo, amor, carinho, dedicação e, se hoje eu sou o que sou, devo inteiramente a ela, que exerceu a função de mãe e pai ao mesmo tempo. Sempre foi uma guerreira, em quem me espelharei para sempre, sendo uma mãe presente em todos os momentos, me apoiando em tudo, ajudando no que se fez necessário, me dando forças nas horas mais difíceis e me aplaudindo nos momentos de alegrias e conquistas.

Sempre me incentivou e ensinou a correr atrás dos meus sonhos e objetivos, nunca permitindo desistir, me apoiando em cada decisão que eu tomasse e correndo ao meu lado atrás dos mesmos objetivos, fazendo o possível e o impossível para que eu conseguisse e tivesse condições de prosseguir. Agradeço pela educação e ensinamentos passados. Deixo meu mais sincero agradecimento e gratidão, por todo amor, cuidado, zelo, dedicação, força e compreensão. A senhora, minha mãe, sempre será meu porto seguro e com quem sei que sempre poderei contar e voltar para seu colo, obrigada por tanto, mãe. Tudo o que sou devo a ti, essa conquista não é só minha e sim nossa, pois sei que esse sonho é tanto meu quanto seu, sei que está realizada assim como estou, tudo o que faço é pensando em ti.

Agradeço ao meu pai, Dejair de Souza Fabricio, o qual mesmo não estando mais aqui, sempre se fez presente em meu coração, ao meu lado, sempre escutando lá do céu as minhas dificuldades, me dando forças e lembranças que me tornasse forte e com motivos para continuar. Se fez presente em meu coração a todo instante, falando para nunca desistir. Será meu herói eternamente, no qual sempre vou me orgulhar e espelhar. Sei que não está de corpo aqui, mas está de alma e coração. Me sinto realizada e sinto que ele também está orgulhoso por

ver a última filha formando, afinal, sempre foi seu sonho ver as filhas formadas. Obrigada por tanto, pai, devo tudo a ti, e tudo o que faço é pensando em ti.

Agradeço imensamente a minhas irmãs, Tatieli e Francieli, por tanto, além de irmãs, são também uma segunda mãe. Agradeço por todo o amor, dedicação, carinho e ensinamentos a mim passados. Agradeço por cada alegria e tristeza compartilhadas nessa jornada, que sem cessar, não me deixaram desistir, estiveram ao meu lado, em todos momentos, me incentivando e ensinando a correr atrás dos meus sonhos, nunca permitindo desistir, apoiando e dando suporte para que eu conseguisse realizá-los.

Agradeço a você, “Franci”, que mesmo de longe, se faz presente, estando em cada momento comigo, no meio da noite falando comigo, escutando minhas aflições, dando forças, motivos e incentivos para não desistir. Você é minha inspiração, obrigada por tanto, obrigada por sempre acreditar no meu potencial, além de irmã, minha amiga, devo tudo isso a você.

Agradeço a você, “Tati”, por se fazer presente sempre, me tirando dos apuros, e também ao Isaac, que é meu sobrinho querido. Você me deu forças e incentivos para cada decisão que eu tomasse, sempre ao meu lado, obrigada por tanto, devo isso a ti também. Meus mais sinceros e puros agradecimentos a vocês. Essa conquista é nossa.

Agradeço aos meus tios, Marcio e Claci, por sempre estarem presentes em todos os momentos da minha vida, sempre me apoiando nas minhas decisões, sempre dando forças, conselhos e motivos para nunca desistir dos meus sonhos, obrigada por todos os ensinamentos, amor, carinho, compreensão que sempre tiveram por mim, sempre me acolhendo como filha, obrigada por tanto, devo muito ao senhores.

Agradeço ao meu namorado, Vinicius Magri de Oliveira, por estar presente em todos os momentos de minha vida. Agradeço por todo amor, carinho, respeito, apoio e compreensão que teve. Agradeço por incentivar e apoiar as minhas decisões, estando presente em toda a minha jornada, não me permitindo desistir, alegrando meus dias difíceis. Obrigada por todo apoio, força e paciência que teve, mostrando que para tudo tem um jeito. Justo agradecer pela sua família, por todo apoio e carinho que me dedicaram.

Agradeço aos amigos que a universidade proporcionou, em especial: Diego, Andrei, Jaqueline, Jeferson, Grazielle, José, Antonio, Vitheli, Camila, Karine e Leonardo. A estes citados, meu eterno obrigada, pelo companheirismo, amizade, força e por todas as contribuições que de qualquer forma, me ajudaram durante esse decorrer.

Agradeço aos meus amigos externos a universidade, em especial: Lorena, Marcos Vinicius, Adolfo, Beatriz, José, Andressa, Laura, Beatriz Trindade e Thaymili. Muito obrigada

por todo auxílio, compreensão e companheirismo, durante todos os momentos que passei em minha formação, que de qualquer forma foi essencial.

Agradeço de forma especial, ao meu professor e amigo, Dr. Leandro Fleck, por ter aceitado ser meu orientador, por toda disponibilidade, conselhos, companheirismo, ensinamentos, atenção, amizade, compreensão, pois sem sua ajuda, não teria dado tão certo e minha formação acadêmica e pessoal não teria se tornado realidade. Tenho um carinho e respeito enorme pelo senhor. Parabéns pelo excelente professor que o és. Meu mais sincero agradecimento, professor, por absolutamente tudo, sempre levarei em meu coração e orações.

Agradeço também, ao meu coorientador, Dr. Leandro Marciano Marra, por toda ajuda necessária e disponibilidade que teve ao meu trabalho e pelo excelente professor que foi.

Agradeço também a todos os meus professores, por todo ensinamento passado, sempre muito dedicados e com conhecimento extraordinário. Obrigada por todos os conselhos, amizade e ensinamentos passados, sempre serei grata e levarei em meu coração, meus mais sinceros agradecimentos.

Por último, não menos importante, agradeço a Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Unidade Universitária de Mundo Novo – UEMS/MN, e a todo seu corpo docente, a direção e administração, meu eterno agradecimento.

Grata por tudo e por todos!!

“A única forma de estar verdadeiramente satisfeito é fazer o que você acredita que seja um bom trabalho”

-Steve Jobs

RESUMO

A cultura da mandioca é uma das maiores fontes de energia na alimentação humana e de animais domésticos. Entretanto, seu processamento resulta na geração de águas residuárias com propriedades nocivas ao ambiente. Para diminuir o efeito adverso desses rejeitos, diferentes técnicas de tratamento vêm sendo aplicadas, dentre as quais cita-se a eletrofloculação. Neste contexto, a presente pesquisa objetivou otimizar o tratamento eletroquímico das águas residuais provenientes do processamento industrial da mandioca. O módulo experimental é constituído por um reator operando em batelada, utilizando sistema de bancada, o qual comportou os eletrodos de sacrifício e o efluente líquido a ser tratado. Os efeitos do tempo de reação do processo eletroquímico e amperagem aplicada ao sistema sobre a variação de pH e remoção de cor e turbidez foram avaliados utilizando-se um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), composto por 12 ensaios. Para remoção de cor e turbidez foi gerado um modelo matemático quadrático representativo do processo, os quais foram validados estatisticamente pela análise de variância (ANOVA) com um intervalo de confiança de 95%. O modelo matemático representativo da remoção de cor foi posteriormente validado com base em dados de eficiência de remoção obtidos em um ensaio de validação conduzido em condições experimentais de 1,05 A e 17,50 minutos. A maior remoção de turbidez ocorreu nas condições de ponto central (1,05 A e 17,50 minutos) e a menor remoção de turbidez, de 67,94%, ocorreu nas condições de 1,05 A e 30,00 minutos. Os fatores analisados não exerceram influência significativa na remoção de turbidez, uma vez que o p-valor obtido é inferior ao nível de significância adotado, de 95%. Para a cor, observou-se que na condição de 0,10 A e 17,50 minutos ocorreu a menor remoção (57,40%) e nas condições de 1,05 A e 17,50 minutos, ocorreu a maior remoção, sendo esta de 86,78%. A Intensidade de Corrente Elétrica e o Tempo de Detenção Hidráulica (termos quadráticos) influenciaram significativamente na eficiência de remoção de cor, sendo o modelo matemático representativo significativo, pois o p-valor obtido (0,0018) é menor que 0,05, valor correspondente ao nível de significância adotado e, quando aplicado em condições reais, o modelo descreveu satisfatoriamente a eficiência de remoção de cor, apresentando erro de 1,05%. Ao avaliar os efeitos das variáveis independentes sobre a variação de pH observa-se que a realização dos ensaios eletroquímicos utilizando eletrodos de alumínio elevam o pH do efluente. Neste contexto, conclui-se que o sistema empregado respondeu satisfatoriamente aos objetivos do presente estudo, mas que maiores eficiências de remoção de cor e turbidez podem ser obtidas em faixas diferentes das variáveis independentes controladas.

Palavras-chave: Efluente líquido. Poluição ambiental. Tratamento eletroquímico.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Produção de mandioca	9
1.2 Geração de efluente líquido	10
1.3 Tratamento de águas residuárias	11
1.4 Tratamento eletroquímico de efluentes líquidos.....	12
1.5 Trabalhos com aplicação da eletrofloculação para o tratamento de efluentes líquidos	13
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral.....	14
2.2 Objetivos específicos	14
3. METODOLOGIA	14
3.1 Módulo experimental.....	14
3.2 Efluente líquido	15
3.3 Delineamento de tratamentos e parâmetros analisados	15
3.4 Geração de modelos matemáticos.....	16
3.5 Validação dos modelos matemáticos propostos	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
4.1 Eficiência de remoção de turbidez.....	17
4.2 Análise de efeitos para remoção de turbidez	19
4.3 Modelo matemático para remoção de turbidez.....	20
4.4 Análise de variância para remoção de turbidez	20
4.5 Superfície de resposta para remoção de turbidez.....	21
4.6 Análise de eficiência de remoção de cor.....	22
4.7 Análise de efeitos para remoção de cor	23
4.8 Modelo matemático para remoção de cor	24
4.9 Análise de Variância para remoção de cor	25
4.10 Superfície de resposta para remoção de cor.....	25
4.11 Validação experimental do modelo matemático proposto.....	26
4.12 Análise de variação de pH após a realização dos ensaios experimentais	27
4.13 Análise de efeitos sobre a variação de pH	27
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1. INTRODUÇÃO

1.1. Produção de mandioca

A cultura da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma das maiores fontes de energia na alimentação humana e de animais domésticos na maioria dos países tropicais, e seu consumo no Brasil é muito expandido. A mandioca é cultivada em todos os estados do país e exibe grande relevância na alimentação humana e animal, além de ser usada como matéria-prima base em vários processos industriais (CARDOSO, 2005).

A planta da mandioca é um arbusto perene de hábito indeterminado, e comercialmente é divulgado vegetativamente por meio de pedaços do caule identificado por manivas (CÂMARA; GODOY, 1998). É fonte de carboidrato e betacaroteno de baixo custo, o que ressalta sua grande importância social em países tropicais e subtropicais necessitados, pois em muitos desses lugares ocorrem condições adversas de clima, sendo excelente opção de cultivo. Em geral, se desenvolve bem em solos profundos, com boa aeração e capacidade de armazenamento de água (LAHAI et al., 2013).

Para Fukuda et al. (2006), levando em consideração a duração do ciclo produtivo, as cultivares de mandioca podem ser identificadas em precoces, quando colhidas com 10 a 14 meses, semiprecoces, quando colhidas entre 14 a 18 meses, e com lentidão, quando o ciclo é superior a 18 meses.

O processamento industrial da mandioca está relacionado à produção de farinha e à extração de fécula, originando vários resíduos que determinam diferentes disposições e tratamentos de acordo com o nível tecnológico e econômico de cada empresa (CAMILI, 2007).

A geração de resíduos industriais vem se tornando um problema ambiental, pois apenas uma pequena parcela dos mesmos são tratados e descartados de forma correta (SCHLLEMER, 2013). Os resíduos originados na industrialização da mandioca são múltiplos, tais como casca, farelo e manipueira, que é o resíduo líquido (CAMILI, 2007). Os maiores produtores e consumidores de mandioca são a África, Ásia e América Latina (COLIN et al., 2006).

Adicionalmente, entre as inúmeras culturas, a mandioca é vista como uma das que apresenta maior produtividade de calorias e é de suma eficiência biológica para produção energética, além de apresentar boa adaptação a solos de baixa fertilidade (NASSAR, 2006). Dados atualizados em agosto de 2020 mostram que a produção estimada da cultura da mandioca no Brasil para a safra de 2020 será de 18.961.138 toneladas (IBGE, 2020).

No Brasil a área cultivada de mandioca em 2017 foi de quase 1,6 milhões de hectares, com produção de 23,7 milhões de toneladas de raízes. O estado do Paraná foi o terceiro maior produtor de raízes de mandioca, ficando atrás apenas dos estados do Pará e Bahia. Neste ano o Paraná acarreta 4,0 milhões de toneladas com o maior lucro médio, em torno de 25,7 t ha⁻¹, sendo maior que o lucro médio brasileiro, 17,7 t ha⁻¹ (IBGE, 2018). Já a Região Centro-Oeste, em especial o estado de Mato Grosso do Sul, recentemente tem aumentado sua exploração da mandioca e consequente produção de fécula, o que se deve a variados fatores, dentre os quais o preço atrativo das áreas agrícolas.

Adicionalmente, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2019), em 2016 a produtividade de mandioca chegou a 15,33 t ha⁻¹, e, segundo dados IBGE, citado por CONAB (2019), em 2018 a produtividade foi de 14,18 t ha⁻¹, com queda de 7,5%.

1.2. Geração de efluente líquido

Entende-se que efluente é tudo aquilo que flui, são resíduos, restos de elementos que já passaram por um processo antes do seu descarte como, por exemplo, o efluente líquido originário do processamento das raízes de mandioca. Para fins de tratamento do efluente líquido, normalmente são considerados os critérios estipulados pela Resolução CONAMA n° 430/2011.

Como consequência do processamento industrial da mandioca, sérios problemas ambientais podem ser originados, tendo em vista que mesmo as pequenas unidades fabris, como as polvilheiras e as casas de farinha, podem produzir quantidades relevantes de resíduos sólidos (entrecasca, casca e bagaço) ou líquidos (água vegetal e manipueira) (CAMARGO et al., 2008).

Fleck et al. (2017) apresentam em seu trabalho a caracterização da água residuária oriunda do processamento da mandioca, onde cita-se: Demanda Química de Oxigênio (6.014 mg L⁻¹) Demanda Bioquímica de Oxigênio (1.400 mg L⁻¹), nitrogênio total (247 mg L⁻¹) fósforo (83 mg L⁻¹), alcalinidade total (2.021 mg L⁻¹), pH (4.02), sólidos totais (6.581 mg L⁻¹), sólidos fixos totais (1.431 mg L⁻¹) e sólidos voláteis totais (5.151 mg L⁻¹).

Mesmo com essas características, o despejo final dos efluentes de fecularia em sua maior parte é feito em corpos hídricos próximos as unidades industriais, ou no solo, sendo capaz de causar contaminação em lençóis freáticos e rios. Este efluente se não tratado corretamente pode oferecer potencial tóxico ao ambiente devido a existência de cianeto livre, um composto existente nas células vegetais das raízes, o qual é tóxico para animais e seres

humanos (SANTOS, 2016). Adicionalmente, apresenta altas taxas de matéria orgânica e seu descarte a céu aberto ou em cursos d'água pode resultar em vários danos ambientais (EPAGRI, 2019) como, por exemplo, a eutrofização, resultante também pelo excesso de nutrientes.

Relacionado a geração e tratamento de efluentes líquidos, tem-se a saúde pública, a qual cada vez mais tem se tornando objeto de estudos e análises, uma vez que, devido a disponibilidade e qualidade da água ser inferior, a saúde da população é afetada diretamente. Entretanto, quando se fala de água, os cuidados, prevenções e tratamentos são de extrema relevância, tendo em vista que a qualidade do ambiente e o bem-estar da população são prioridades e estão inter-relacionados.

1.3 Tratamento de águas residuárias

A crescente população e os crescentes processos industriais causaram problemas e preocupações em relação aos recursos naturais. Essa questão vem se agravando com a exposição do ecossistema a imensa quantidade de efluentes e poluentes continuamente despejados em cursos hídricos receptores.

A água, essencial para vida, é o um recurso natural comum para os humanos, animais e plantas. Contudo, a água, é o elemento que mais sofre as consequências causadas pelo homem e, principalmente pela industrialização, a qual acelera a poluição dos cursos hídricos, tornando-os cada vez mais limitados.

Segundo Cerqueira (2006), a legislação ambiental está se tornando a todo instante mais rigorosa, com isso, o tratamento de efluentes está sendo obrigatório antes de seu descarte, para evitar sérios danos ecológicos e toxicológicos ao ecossistema. Nesse contexto, podem ser citados vários sistemas de tratamento de efluentes líquidos, dentre os quais: biodigestão anaeróbia, nitrificação, desnitrificação, tratamentos físico-químicos, entre outros.

A biodigestão anaeróbia, é um processo de decomposição da matéria orgânica, que ocorre na ausência de oxigênio, transformando compostos orgânicos complexos em substâncias simples como dióxido de carbono e metano (FLECK et al., 2017).

A nitrificação ocorre na presença de oxigênio e consiste na oxidação da amônia a nitrito e, subsequentemente, nitrito a nitrato (CHARLEY et al., 1980; FLECK et al., 2018). A desnitrificação ocorre em ambientes com ausência de oxigênio molecular, no qual o nitrato é reduzido a nitrogênio gasoso (NARKIS et al., 1979). Adicionalmente, tratamentos físico-químicos, são responsáveis pela remoção de contaminantes por meio da separação de fases líquidas e sólidas.

1.4 Tratamento eletroquímico de efluentes líquidos

Devido aos impactos ambientais dos efluentes líquidos, a busca pelo desenvolvimento de sistemas alternativos de tratamento de águas residuais vem sendo efetuada como forma de reduzir os impactos causados ao ambiente natural (WANG et al., 2012).

Atualmente, o que se busca para o tratamento de efluentes líquidos são mecanismos de elevada eficiência e de baixo custo. Nesse contexto, a eletrofloculação surge como uma alternativa promissora e que merece ser otimizada, pois é um método de tratamento que possibilita elevada eficiência na remoção dos constituintes das águas residuais, mas sobre o qual ainda vigora uma incerteza sobre a sua viabilidade econômica.

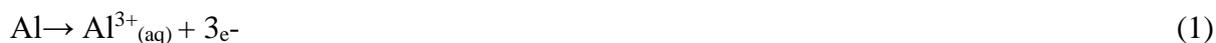
A eletrofloculação é um tratamento eletroquímico, sendo a eletrólise a essência do processo de tratamento. O efluente que é tratado percorre entre eletrodos, geralmente placas de alumínio e/ou ferro, ordenadas conjuntamente, em fluxo vertical ou horizontal, instigado por corrente elétrica constante, fornecida por uma fonte autorregulada (LOUREIRO, 2008).

No decorrer do tratamento, as moléculas orgânicas são dissolvidas na água por constante iônica, e os sais inorgânicos, sofrem separação eletrolítica, perturbando o equilíbrio iônico do meio, insolubilizando um grande número de moléculas orgânicas e modificando as inorgânicas. Inúmeras reações acontecem ao nível dos eletrodos, limitando os poluentes por oxidação, sedimentação, flotação, floculação e dissociação ou coagulação (LOUREIRO, 2008).

De acordo com Loureiro (2008), no ânodo, são formados íons de alumínio e/ou ferro, dependendo do eletrodo utilizado, que se hidrolisa, desenvolvendo o agente de coagulação, aderindo os fragmentos insolubilizados dos poluentes, gerando então os flocos, depurando o efluente e diminuindo a concentração de parâmetros como, detergentes, óleos, sólidos, graxas, demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fenóis, metais pesados, dentre outros.

Adicionalmente, Paschoal e Tremiliosi-Filho (2005), afirmam que na eletrofloculação não se realiza o acréscimo de floculantes, o que evita a geração de lodo residual. É um tratamento eletroquímico baseado na formação de gases, oxigênio e hidrogênio, onde mudam os aditivos floculantes. O processo consiste em quatro etapas, sendo elas: (1) geração de pequenas bolhas de gás; (2) contato entre as bolhas e as partículas em suspensão; (3) adsorção das pequenas bolhas de gás na superfície das partículas e; (4) ascensão do conjunto partículas/bolhas para a superfície. Sendo assim, toda aquela matéria em suspensão é eletroflotada, fazendo-o tornar claro o líquido tratado. Na superfície, origina-se uma camada de espuma que envolve as partículas flotadas que se tornam facilmente removidas.

Resumidamente, de acordo com Cerqueira et al. (2011), no processo eletroquímico de tratamento de efluentes utilizando eletrodos de alumínio, ocorre a oxidação no ânodo (Equação 1), o qual sofre hidrólise (Equação 2) com a formação do agente coagulante $\text{Al}(\text{OH})_3$.



Adicionalmente a formação do agente coagulante, a eletrofloculação gera microbolhas de gases (Equação 3), as quais são responsáveis pela flotação de óleos, graxas e outros compostos particulados.



1.5 Trabalhos sobre aplicação da eletrofloculação para o tratamento de efluentes líquidos

Benazzi (2013) analisou a aplicação do processo de eletrofloculação assistido por peróxido de hidrogênio, no tratamento de efluentes de laticínio. Primeiramente, realizou-se um estudo comparativo em batelada utilizando os processos convencionais (sulfato de alumínio e poli cloreto de alumínio) e o tratamento com eletrofloculação. Para determinar o potencial e a eficiência do processo avaliado na remoção da matéria orgânica, quando comparado as eficiências adquiridas pelos tratamentos convencionais, realizaram-se ensaios de tratamento de efluente de laticínio com o processo de eletrofloculação em um reator de fluxo contínuo, usando eletrodos de alumínio. Foi avaliada a influência das variáveis manipuladas: distância entre eletrodos, voltagem (potencial elétrico aplicado) e tempo de residência hidráulica, monitorando-se ainda a evolução do pH, condutividade e densidade de corrente.

Fleck et al. (2013) estudaram a utilização da técnica de eletrofloculação para o tratamento de efluentes industriais, com enfoque ao efluente têxtil. A intensa coloração é a característica dominante em efluentes têxteis, como resultado da utilização de corantes para o tingimento do tecido. A sua toxicidade, baixa biodegradabilidade e a presença de corantes causa numerosos impactos aos seres vivos, o que justifica a busca por métodos alternativos para remoção desses constituintes. Estudos explicam que a eficiência do processo de eletrofloculação para o tratamento de efluentes industriais é dependente de fatores como condutividade elétrica, distância dos eletrodos de sacrifício e pH do meio reacional.

Orssatto et al. (2016) avaliaram a eficiência da eletrofloculação para o tratamento do efluente de uma lavanderia industrial, objetivando otimizar os parâmetros de operação e viabilizar o reuso da água residuária. Utilizou-se um reator operando em sistema de batelada,

onde foram imersos eletrodos de sacrifício conectados a uma fonte de corrente contínua. Os autores concluíram que a eletrofloculação consiste em uma boa alternativa para o tratamento de efluentes de lavanderias industriais, apresentando uma elevada eficiência na remoção de poluentes.

Um ponto a ser destacado é a limitação de trabalhos publicados que avaliaram a eficiência do sistema de eletrofloculação aplicado ao tratamento da água residuária proveniente do processamento da mandioca.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Otimizar o tratamento eletroquímico das águas residuais provenientes do processamento industrial da mandioca.

2.2. Objetivos específicos

Avaliar a eficiência da eletrofloculação para a remoção dos parâmetros cor e turbidez do efluente de fecularia.

Avaliar os efeitos das variáveis independentes sobre a variação de pH e eficiência de remoção de cor e turbidez.

Gerar um modelo matemático representativo do processo de eletrofloculação aplicado ao tratamento da água residuária oriunda do processamento da mandioca.

3.METODOLOGIA

3.1 Módulo experimental

O módulo experimental é constituído por um reator operando em batelada, utilizando sistema de bancada (béquer de 1L), o qual comportou os eletrodos de sacrifício de alumínio, com 9 cm de comprimento e 5 cm de largura, e o efluente líquido a ser tratado eletroquimicamente. Os eletrodos, separados por um isolante plástico, foram conectados a uma fonte de corrente contínua para que o processo eletrolítico fosse possível, conforme pode ser observado na Figura 1.

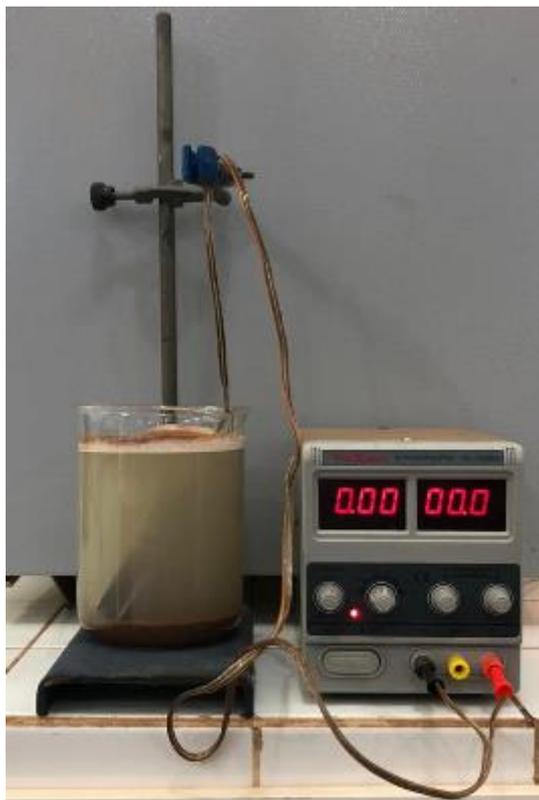


Figura 1. Módulo experimental.

3.2. Efluente líquido

O efluente líquido a ser utilizado nos ensaios eletroquímicos foi coletado em uma fecularia localizada no estado de Mato Grosso do Sul, na região Cone-sul. Após coletado, o efluente foi armazenado em condições de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, para que as características físico-químicas não fossem alteradas até o momento de uso nos ensaios experimentais.

3.3 Delineamento de tratamentos e parâmetros analisados

Os efeitos da intensidade de corrente elétrica (amperagem) e Tempo de Detenção Hidráulica (minutos) sobre a eficiência de remoção de cor, turbidez e variação de pH foram avaliados utilizando-se um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), ou seja, um esquema fatorial de tratamentos composto por 4 ensaios axiais, 4 ensaios fatoriais e 4 repetições no ponto central, totalizando 12 ensaios, conforme condições codificadas e reais apresentadas na Tabela 1. Salienta-se que os valores reais das variáveis codificadas foram determinados a partir de análises preliminares.

Tabela 1. Delineamento Composto Central Rotacional.

Intensidade de Corrente		Tempo de Detenção Hidráulica (TDH)	
Codificado	Real (A)	Codificado	Real (min)
-1	0,38	-1	8,63
+1	1,72	-1	8,63
-1	0,38	+1	26,37
+1	1,72	+1	26,37
-1,41	0,10	0	17,50
+1,41	2,00	0	17,50
0	1,05	-1,41	5,00
0	1,05	+1,41	30,00
0	1,05	0	17,50
0	1,05	0	17,50
0	1,05	0	17,50
0	1,05	0	17,50

A condutividade elétrica do efluente 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.

Após cada ensaio experimental, o efluente eletrofloculado permaneceu em repouso em bancada, por 30 minutos, para a flotação/decantação, com extremo cuidado para que o efluente tivesse a menor agitação possível. Depois desse período, foram realizadas as coletas para a análise. A retirada da amostra do efluente foi realizada no centro do béquer, com o auxílio de uma mangueira adaptada a uma seringa, sem agitação. Após coletado, o efluente tratado foi armazenado sob temperatura de -5 °C, com a identificação das condições experimentais características de cada ensaio experimental, para posterior análises físico-químicas

As análises de eficiência de remoção de cor foram realizadas seguindo o método 2120B (APHA, 2012), a eficiência de remoção de turbidez foi avaliada utilizando um Turbidímetro e a variação de pH foi avaliada utilizando um pHmetro digital de banca. Todas as determinações analíticas foram realizadas em triplicata, sendo considerados apenas os valores médios destas medidas.

3.4 Geração de modelos matemáticos

Para cada variável resposta (remoção de cor e turbidez) 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, utilizando o

software Statística (versão 11.0). O modelo matemático codificado ajustado a partir dos dados experimentais, é apresentado na Equação 4.

$$\text{Variável resposta} = a_1 + a_2 I.C + a_3 I.C^2 + a_4 TDH + a_5 TDH^2 + a_6 I.C \times TDH \quad (4)$$

Onde:

a = coeficientes ajustados a partir dos dados experimentais.

I.C = valor codificado da intensidade de corrente.

TDH = valor codificado do Tempo de Detenção Hidráulica.

3.5 Validação dos modelos matemáticos propostos

A significância estatística dos modelos matemáticos originados no sistema foi testada pela Análise de Variância (ANOVA) com um intervalo de confiança de 95%. Posteriormente, o modelo matemático representativo da eficiência de remoção de cor foi validado com base em dados de eficiência obtidos em um ensaio experimental de validação conduzido em condições experimentais dentro dos limites em que foi gerado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Eficiência de Remoção de Turbidez

Na Tabela 2 é apresentado a eficiência de remoção de turbidez nas diferentes condições experimentais dos fatores estudados: Intensidade de Corrente Elétrica e Tempo de Detenção Hidráulica. Observa-se que a maior remoção de turbidez ocorreu nas condições de ponto central (1,05 A e 17,50 minutos). Por outro lado, a menor remoção de turbidez, de 67,94%, ocorreu nas condições de 1,05 A e 30,00 minutos. Salienta-se a baixa variabilidade entre as eficiências obtidas nas diferentes condições experimentais, o que é um indício de que na faixa estudada das variáveis independentes, a influência destas sobre a eficiência do sistema, não apresenta significância estatística.

Tabela 2. Eficiência de remoção de turbidez.

Intensidade de Corrente		Tempo de Detenção Hidráulica		Remoção (%)
Codificado	Real (A)	Codificado	Real (min)	
-1	0,38	-1	8,63	69,01
+1	1,72	-1	8,63	70,00
-1	0,38	+1	26,37	69,12
+1	1,72	+1	26,37	69,12
-1,41	0,10	0	17,50	69,24
+1,41	2,00	0	17,50	68,59
0	1,05	-1,41	5,00	68,45
0	1,05	+1,41	30,00	67,94
0	1,05	0	17,50	69,03
0	1,05	0	17,50	70,03
0	1,05	0	17,50	69,23
0	1,05	0	17,50	68,80

Módenes et al. (2017) aplicaram a técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes de abatedouro de aves. Utilizou-se um planejamento fatorial completo com três variáveis independentes: corrente elétrica, pH e tempo de eletrólise. A eficiência máxima de turbidez que os autores encontraram foi de 99,96%, valor superior ao encontrado no presente estudo.

Orssatto et al. (2016) verificou que a eletrofloculação é uma boa opção ao tratamento de efluentes de lavanderias industriais, uma vez que, apresentou elevada remoção de DQO, cor e turbidez. Com isso, é possível viabilizar o processo de reuso do efluente tratado, seja no primeiro enxague nos processos de lavagem ou em outro uso menos nobre. A melhor condição experimental observada foi de 20 V para a ddp e 20 minutos para o Tempo de Detenção Hidráulica.

Cerqueira (2006) evidenciou os melhores resultados de eficiência de remoção de poluentes (93 % para turbidez) utilizando eletrodos de alumínio nas condições de: intensidade de corrente de 3 A, tempo de 10 min, distância entre eletrodos de 0,5 cm e pH inicial 5.

Nascimento (2018) concluiu em seu estudo que a otimização do processo de eletrofloculação através do planejamento fatorial permitiu eficiência satisfatória na clarificação da água de manancial superficial, de maneira que os resultados adquiridos para a cor e turbidez se enquadraram dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação. Demonstrou também que as eficiências na remoção da turbidez e cor da água dependeram significativamente dos três fatores considerados: condutividade, tempo de eletrólise e pH da água, sendo estas variáveis de suma importância para o processo. Os eletrodos de alumínio se

mostraram muito eficientes, chegando a 100 % para remoção da cor verdadeira e 93 % na remoção da turbidez.

4.2 Análise de efeitos para remoção de turbidez

Na Tabela 3 são apresentados os efeitos dos fatores estudados (intensidade de corrente elétrica e Tempo de Detenção Hidráulica) sobre a variável resposta (eficiência de remoção turbidez). Para a remoção de turbidez, nenhum dos fatores e a interação entre eles foi considerada estatisticamente significativa, pois o p-valor obtido é maior que o nível de significância adotado, de 95%.

A intensidade de corrente elétrica (termos linear e quadrático) apresentam efeito positivo sobre a variável dependente, ou seja, em maiores intensidades de corrente elétrica há maior probabilidade de ocorrer maior remoção de turbidez. Entretanto, o TDH (termos linear e quadrático) e a interação entre os fatores apresentaram efeito negativo, com um nível de significância de 95%.

Tabela 3. Análise de efeitos para a remoção Turbidez.

Fator	Efeito	p-valor
Média	69,270	0,000
I. Corrente (L)	0,018	0,969
I. Corrente (Q)	0,026	0,961
TDH (L)	-0,373	0,442
TDH (Q)	-0,699	0,219
I. Corrente x TDH	-0,495	0,469

No Gráfico de Pareto, apresentado na Figura 2, são representados os efeitos padronizados estimados (razão entre os efeitos estimados e o desvio padrão) que cada variável independente exerce na variável resposta, com significância estatística de 95% ($p < 0,05$). É possível observar que nenhum dos fatores controlados (variáveis independentes) exerceram efeito significativo sobre a eficiência de remoção da turbidez. Entretanto, mesmo não sendo significativo no intervalo de confiança de 95%, evidencia-se que o TDH exerceu maior influência sobre o processo avaliado.

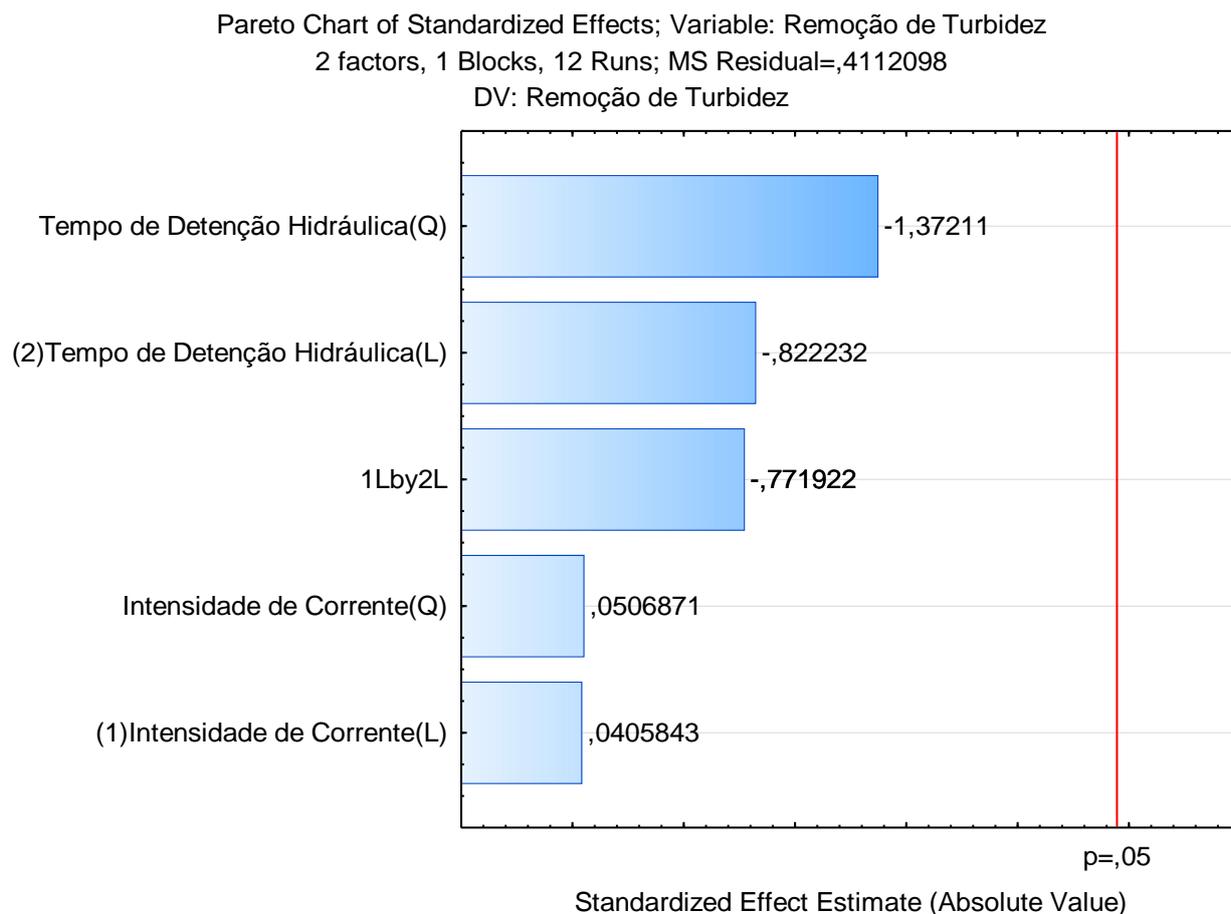


Figura 2. Gráfico de Pareto para remoção de turbidez.

4.3 Modelo matemático para remoção de turbidez

O modelo matemático proposto representativo do processo, para remoção da turbidez, é apresentado na Equação 5. Os coeficientes foram estimados por análise de regressão linear múltipla, utilizando o método dos mínimos quadrados, através do software Statistica (versão 11.0).

$$RemoçãoTurbidez(\%) = 69,270 + 0,009I.C + 0,013I.C^2 - 0,187TDH - 0,349TDH^2 - 0,248I.C \times TDH$$

Em que:

I.C: valor codificado da intensidade de corrente.

TDH: valor codificado do Tempo de Detenção Hidráulica.

4.4 Análise de Variância para remoção de turbidez

Como pode ser observado na Tabela 4, nenhum dos fatores analisados e a interação entre eles influenciaram significativamente na remoção da turbidez para o processo de

tratamento eletroquímico da água residuária proveniente da produção de fécula de mandioca, uma vez que o p-valor obtido é maior que o nível de significância adotado, de 5%.

Esses resultados corroboram com a discussão apresentada para a Tabela 2, onde evidenciou-se a baixa variabilidade entre as eficiências de remoção de turbidez obtidas pelo sistema eletrolítico. Entretanto, salienta-se que essas conclusões se aplicam exclusivamente para as faixas de operação das variáveis independentes aplicadas ao sistema.

Tabela 4. Análise de variância para a remoção de Turbidez.

Fator	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	p-valor
I. Corrente (L)	0,0007	1	0,0007	0,969
I. Corrente (Q)	0,0011	1	0,0011	0,961
TDH (L)	0,2780	1	0,2780	0,442
TDH (Q)	0,7742	1	0,7742	0,219
I. Corrente x TDH	0,2450	1	0,2450	0,469
Resíduo	2,4673	6	0,4112	
Total	3,7663	11		

Na Tabela 5 observa-se o resumo da Análise de Variância (ANOVA) para a validação estatística do modelo matemático proposto para a remoção de turbidez, o qual não é estatisticamente significativo, uma vez que o p-valor obtido (0,685), é inferior ao nível de significância adotado, de 5%.

Tabela 5. Validade estatística do modelo matemático proposto para remoção de Turbidez.

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	p-valor
Regressão	1,2990	5	0,2598	0,685
Resíduos	2,4673	6	0,4112	
Total	3,7663	11		

4.5 Superfície de resposta para remoção de turbidez

Na Figura 3 é apresentada a superfície de resposta representativa do modelo matemático proposto para a simulação da eficiência de remoção da turbidez. Conforme pode ser observado, a maior remoção de turbidez ocorre próxima ao ponto central para o TDH e em condições superiores ao ponto central para a intensidade de corrente elétrica. Embora o modelo matemático não tenha sido estatisticamente significativo, optou-se por apresentar a superfície de resposta, com o intuito de evidenciar o comportamento da porcentagem de remoção de turbidez em função dos fatores controlados.

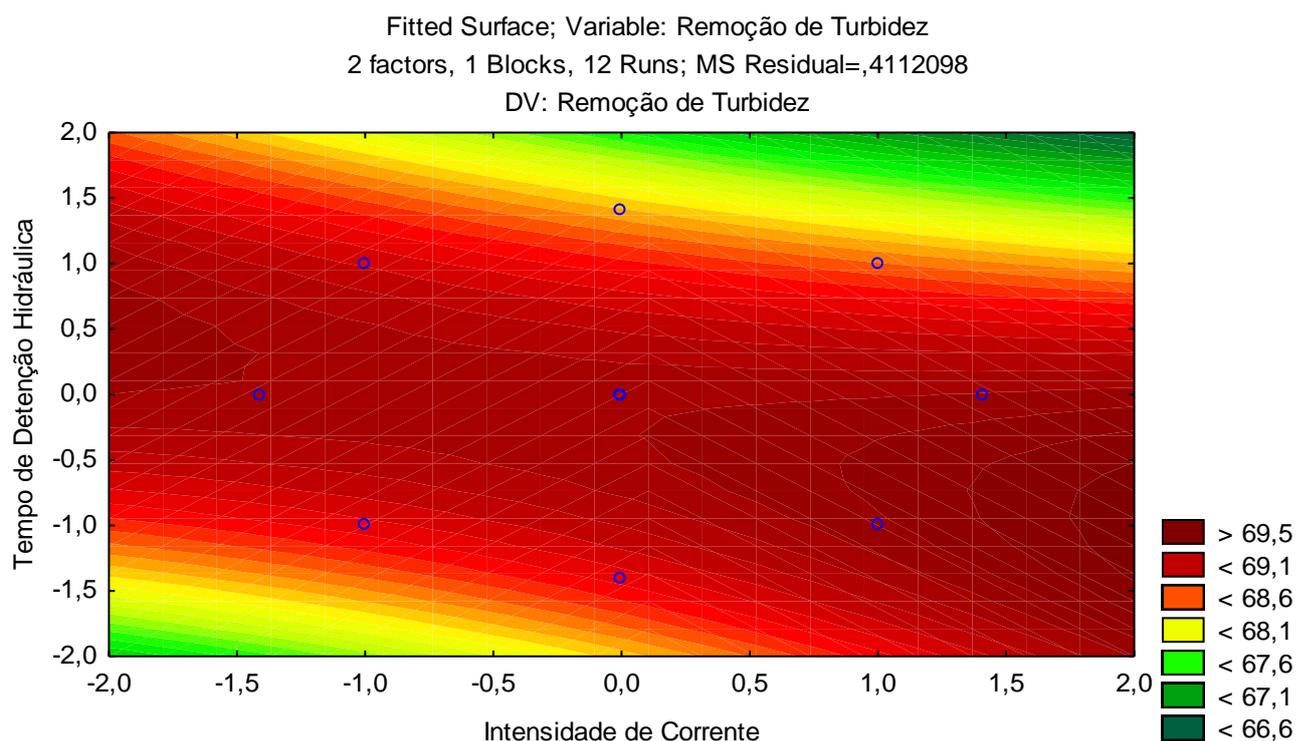


Figura 3. Superfície de resposta para a remoção de turbidez.

4.6 Análise de eficiência de remoção de cor

Na Tabela 6 é apresentada a eficiência de remoção de cor para os diferentes ensaios do delineamento experimental. Na condição de 0,10 A e 17,50 minutos ocorreu a menor remoção de cor dentre todos os ensaios experimentais realizados, sendo esta de 57,40%. Em contrapartida, a maior remoção de cor ocorreu nas condições de 1,05 A e 17,50 minutos, sendo esta de 86,78%.

Módenes et al. (2017) ao aplicar a técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes de abatedouro de aves, utilizando um planejamento fatorial completo com três variáveis independentes, obtiveram 100% de remoção de cor nas condições de 2 A, pH igual a 10 e tempo de eletrólise de 80 minutos. O percentual de remoção de cor superior, pode ser justificado pela amperagem e tempo de eletrólise superiores aos aplicados no presente estudo.

Observa-se também que em todos os ensaios conduzidos na condição do ponto central (1,05 A e 17,50 minutos), a eficiência de remoção de cor foi similar, o que era esperado, pois os ensaios foram conduzidos nas mesmas condições experimentais, comprovando que o experimento e os resultados obtidos são confiáveis, apresentando baixa variabilidade.

Tabela 6. Eficiência para a eficiência de remoção de cor.

Intensidade de Corrente		Tempo de Detenção Hidráulica		Remoção (%)
Codificado	Real (A)	Codificado	Real (min)	
-1	0,38	-1	8,63	69,27
+1	1,72	-1	8,63	57,77
-1	0,38	+1	26,37	70,05
+1	1,72	+1	26,37	63,78
-1,41	0,10	0	17,50	57,40
+1,41	2,00	0	17,50	60,15
0	1,05	-1,41	5,00	59,69
0	1,05	+1,41	30,00	71,45
0	1,05	0	17,50	81,24
0	1,05	0	17,50	84,27
0	1,05	0	17,50	86,22
0	1,05	0	17,50	86,78

4.7 Análise de efeitos para remoção de cor

Conforme apresentado na Tabela 7, o TDH e a intensidade de corrente elétrica (termos quadráticos) apresentam efeito negativo significativo sobre a variável dependente, uma vez que o p-valor obtido em ambos os casos é inferior ao nível de significância adotado, de 95%.

Tabela 7. Análise de efeitos para a remoção cor.

Fator	Efeito	p-valor
Média	84,62	0,000*
I. Corrente (L)	-3,48	0,294
I. Corrente (Q)	-24,40	3×10^{-4} *
TDH (L)	5,86	0,101
TDH (Q)	-17,56	0,002*
I. Corrente x TDH	2,62	0,563

*estatisticamente significativo com um intervalo de confiança de 95%.

No Gráfico de Pareto para a eficiência de remoção de cor, apresentado na Figura 4, é possível observar que a Intensidade de Corrente Elétrica (Q) e o Tempo de Detenção Hidráulica (Q) exerceram efeito significativo na eficiência de remoção da cor, entretanto evidencia-se que a Intensidade de Corrente Elétrica (Q) exerceu maior influência sobre o processo avaliado.

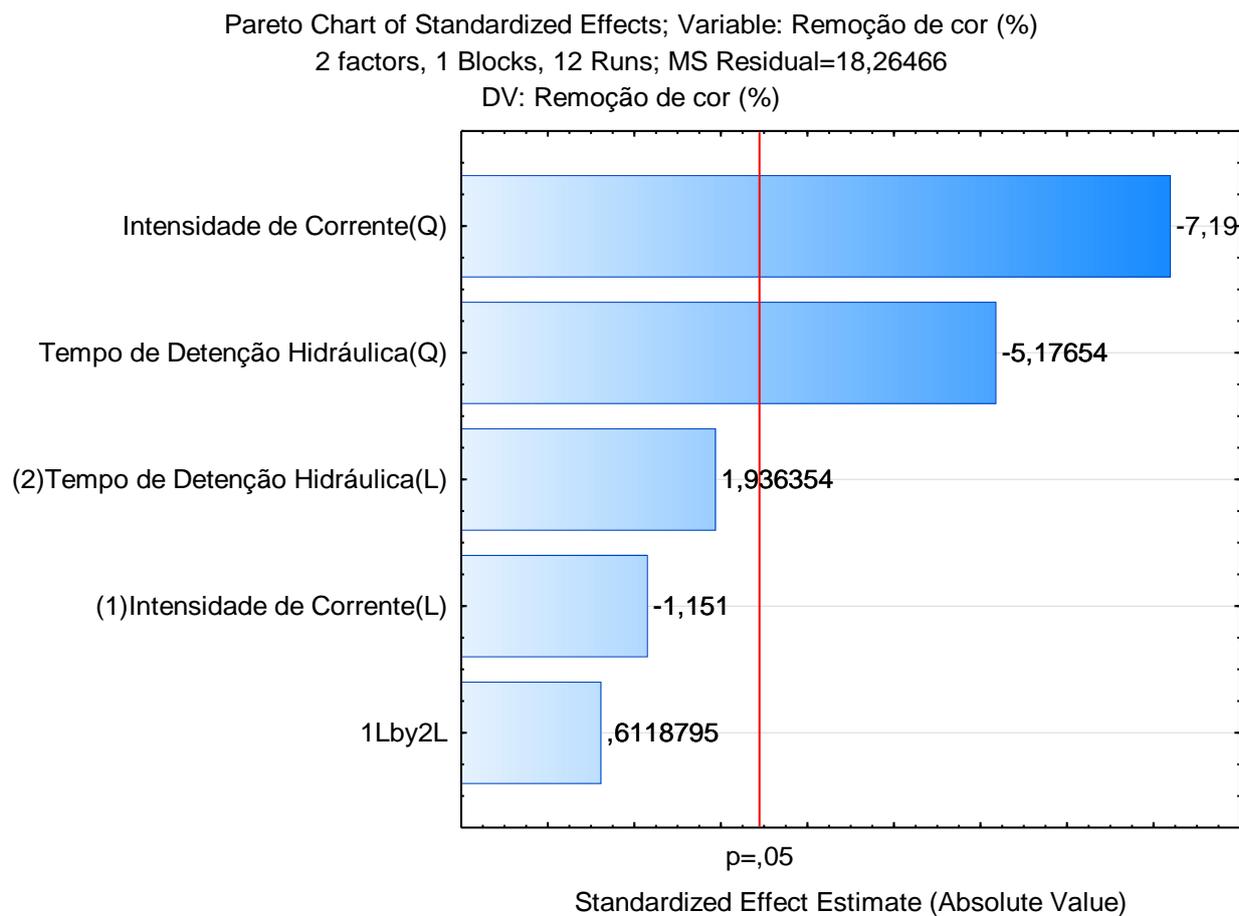


Figura 4. Gráfico de Pareto para remoção de cor.

4.8 Modelo matemático para remoção de cor

O modelo matemático proposto representativo do processo, para remoção da cor, é apresentado na Equação 6. Os coeficientes foram estimados por análise de regressão linear múltipla, utilizando o método dos mínimos quadrados, através do software Statistica (versão 11.0).

$$Remoção_cor_(\%) = 84,62 - 1,74I.C - 12,20I.C^2 + 2,93TDH - 8,78TDH^2 + 1,31I.C \times TDH$$

Em que:

I.C: valor codificado da intensidade de corrente.

TDH: valor codificado do Tempo de Detenção Hidráulica.

4.9 Análise de Variância para remoção de cor

Como pode ser observado na Tabela 8, dentre os fatores analisados, a Intensidade de Corrente Elétrica (Q) e o Tempo de Detenção Hidráulica (Q) influenciaram significativamente na eficiência de remoção de cor, para o processo de tratamento eletroquímico da água residuária proveniente da produção de fécula de mandioca, pois o p-valor foi menor que 0,05%.

Tabela 8. Análise de variância para a remoção de cor.

Fator	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	p-valor
I. Corrente (L)	24,197	1	24,197	0,294
I. Corrente (Q)	944,556	1	944,556	3×10^{-4} *
TDH (L)	68,483	1	68,483	0,101
TDH (Q)	489,431	1	489,431	0,002*
I. Corrente x TDH	6,838	1	6,838	0,563
Resíduo	109,588	6	18,2647	
Total	1643,093	11		

*estatisticamente significativo com um intervalo de confiança de 95%.

Na Tabela 9 observa-se o resumo da Análise de Variância (ANOVA) para a validação estatística do modelo matemático proposto para a remoção de cor, o qual é estatisticamente significativo, uma vez que o p-valor obtido (0,0018) é menor que 0,05%, valor correspondente ao nível de significância adotado. Em termos práticos, entende-se que o modelo matemático poderá ser aplicado para a simulação de cenários futuros, simulando a eficiência de remoção de cor de efluente de fecularia, dentro da faixa das variáveis independentes em que foi gerado.

Tabela 9. Validade estatística do modelo matemático proposto para remoção de cor.

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	p-valor
Regressão	1533,51	5	306,70	0,0018*
Resíduos	109,59	6	18,27	
Total	1643,10	11		

*estatisticamente significativo com um intervalo de confiança de 95%.

4.10 Superfície de resposta para remoção de cor

Na Figura 5 é apresentada a superfície de resposta representativa do modelo matemático proposto para a simulação da eficiência de remoção da cor do efluente de fecularia. Conforme pode ser observado, o experimento foi otimizado, sendo que a maior eficiência de remoção de

cor ocorre nas condições experimentais próximas ao ponto central de ambas as variáveis independentes consideradas no presente estudo.

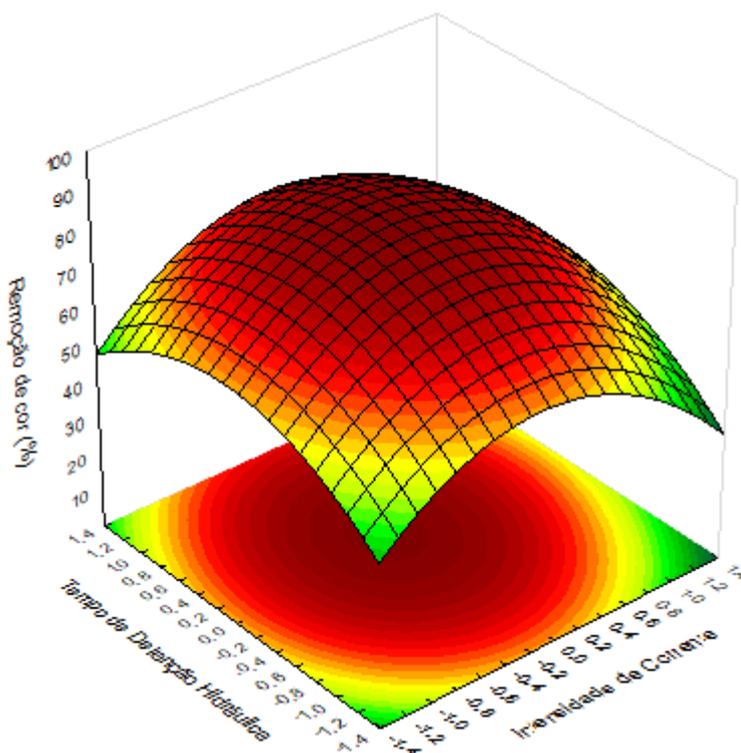


Figura 5. Superfície de resposta para a eficiência de remoção de cor.

4.11 Validação experimental do modelo matemático proposto

Na Tabela 10 observa-se as eficiências prevista e observada para a remoção de cor, de acordo com um ensaio experimental conduzido em triplicata nas condições ótimas de operação do sistema de eletrofloculação (1,05 A e 17,50 min). O modelo matemático proposto descreveu satisfatoriamente a eficiência de remoção de cor, apresentando erro de 1,05%. Com base nesse resultado é possível inferir que o modelo matemático gerado para a remoção de cor apresenta elevada capacidade preditiva e pode ser utilizado para simular situações reais para a técnica de eletrofloculação aplicada ao tratamento do efluente de fecularia.

Tabela 10. Validação experimental do modelo matemático proposto.

Parâmetro	Eficiência Prevista (%)	Eficiência Observada (%)	Erro (%)
Cor	84,62	83,74	1,05

4.12 Análise de variação de pH após a realização dos ensaios experimentais

Na Tabela 11 é apresentado o comportamento do pH do efluente de fecularia após passar pelo tratamento eletroquímico nas diferentes condições experimentais. Na condição de 2,00 A e 17,50 minutos é possível observar o menor pH dentre os ensaios eletroquímicos realizados, de 4,42. Em contrapartida, o maior valor de pH, de 5,42, foi observado nas condições de 1,05 A e 17,50 minutos.

O pH do efluente bruto, sem aplicação do tratamento eletroquímico é 4,38, o que evidencia que a realização dos ensaios eletroquímicos utilizando eletrodos de alumínio elevam o pH do efluente. Neste contexto, Crespilho et al. (2004) afirmam que a eletrofloculação tem a propriedade de aumentar o valor do pH do efluente, após seu tratamento, caso o efluente tenha características ácidas, o que se deve principalmente ao princípio de que a eletrofloculação produz íons OH^- .

Tabela 11. Variação do pH em função das diferentes condições experimentais.

Intensidade de Corrente		Tempo de Detenção Hidráulica		Variação de pH
Codificado	Real (A)	Codificado	Real (min)	
-1	0,38	-1	8,63	4,50
+1	1,72	-1	8,63	4,66
-1	0,38	+1	26,37	4,59
+1	1,72	+1	26,37	4,92
-1,41	0,10	0	17,50	4,48
+1,41	2,00	0	17,50	4,42
0	1,05	-1,41	5,00	4,72
0	1,05	+1,41	30,00	5,10
0	1,05	0	17,50	5,08
0	1,05	0	17,50	5,42
0	1,05	0	17,50	5,40
0	1,05	0	17,50	5,38

4.13 Análise de efeitos sobre a variação de pH

Conforme pode ser observado na Tabela 12, a intensidade de corrente elétrica e o tempo de detenção hidráulica (termos quadráticos) apresentaram efeito negativo significativo sobre a variação do pH, uma vez que o p-valor obtido é inferior ao nível de significância adotado, de 95%.

Tabela 12. Análise de efeitos para a alteração do pH.

Fator	Efeito	p-valor
Média	5,32	0,000
I. Corrente (L)	0,10	0,356
I. Corrente (Q)	-0,88	2x10 ⁻⁴ *
TDH (L)	0,22	0,071
TDH (Q)	-0,42	0,011*
I. Corrente x TDH	0,09	0,575

*estatisticamente significativo com um intervalo de confiança de 95%.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a turbidez, observou-se que as variáveis independentes controladas não influenciaram significativamente na eficiência do sistema. Entretanto, a maior remoção de turbidez ocorre próximo ao ponto central para o TDH e em condições maiores ao ponto central para a intensidade de corrente elétrica.

As maiores remoções de cor são obtidas próximas as condições do ponto central e o modelo matemático representativo do processo pode ser utilizado para simular eficiências de remoção de cor da água residuária do efluente de fecularia, dentro dos limites das variáveis independentes em que foi gerado.

Os ensaios eletroquímicos elevam o pH do efluente proveniente do processamento da fécula de mandioca. Conclui-se que o sistema empregado respondeu satisfatoriamente aos objetivos do presente estudo, mas que maiores eficiências de remoção de cor e turbidez podem ser obtidas em faixas diferentes das variáveis independentes controladas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA- **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 22^a ed. Washinton, DC – EUA, 2012.

BENAZZI, T. L. **Otimização de um sistema de eletrofloculação em fluxo contínuo para o tratamento de efluentes líquidos das indústrias de laticínios**. 2013. Tese – (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2013.

CÂMARA, G. M. S.; GODOY, O. P. I. Desempenho vegetativo e produtivo de cultivares de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) a partir de manivas com diferentes diâmetros. **Scientia Agricola**, v.55, p. 326-333, 1998.

CAMARGO, K. F; LEONEL, M.; MISCHAN, M. M. Produção de biscoitos extrusados de polvilho azedo com fibras: efeito de parâmetros operacionais sobre as propriedades físicas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 28, n. 3, p. 586-591, 2008.

CAMILI, E. A. **Tratamento da maniveira por processo de flotação sem o uso de agentes químicos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2007.

CARDOSO, E. **Uso de maniveira como biofertilizante no cultivo do milho: avaliação do efeito no solo, nas águas subterrâneas e na produtividade do milho**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, 2005.

CEPEA - CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **Produção de fécula em 2010 e menor desde 2005; valor da produção e o maior desde 2004**. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, 2011.

CERQUEIRA, A. A. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis**. Dissertação (Mestrado em Química). Curso de Pós-Graduação em Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2006.

CERQUEIRA, A. A.; MARQUES, M. R. C; RUSSO, C. Avaliação do processo eletrolítico em corrente alternada no tratamento de água de produção. **Química Nova**, v. 34, n. 1, p. 59-63, 2011.

COLIN, X.; FARONET, J. L.; ROJAS, O.; ALAZARD, D. Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flow filter with bamboo as support. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 1602-1607, 2006.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Análise Mensal: mandioca**. Disponível em: conab.gov.br. Acesso em: 06 out. 2020.

CHARLEY, R. C.; HOOPER, D. G.; MCLEE, A. G. Nitrification kinetics in activated sludge at various temperatures and dissolved oxygen concentrations. **Water Research**, v. 14, n. 10, p.1387-1396, 1980.

CRISPILHO, F. N.; SANTANA, C. G.; REZENDE, M. O. O. Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. **Química Nova**, v. 27, n. 3, p. 387-392, 2004.

EPAGRI. **Tratamento de efluentes transforma resíduo tóxico dos engenhos de farinha de mandioca em adubo**. Disponível em: <https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/2019/10/22/modelo-de-tratamento-de-efluentes-desenvolvidos-com-o-apoio-da-epagri-possibilita-que-engenhos-de-farinha-de-mandioca-trabalhem-sem-causar-impactos-ao-meio-ambiente/>. Acesso em: 13 fev. 2020.

FLECK, L.; TAVARES, M. H. f; EYNG, Eduardo; ANDRADE, M. A. M; FRARE, L. M. Optimization of anaerobic treatment of cassava processing wastewater. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 3, p. 574-590, 2017.

FLECK, L.; TAVARES, M. H. F; EYNG, E.; ORSSATTO, F. Optimization of the nitrification process of wastewater resulting from cassava starch production. **Environmental Technology**, v. 40, n. 25, p. 3318-3327, 2018.

FLECK, L.; TAVARES, M. H. F.; EYNG, E. Utilização da técnica de eletrofloculação para o tratamento de efluentes têxteis: uma revisão. **Revista Eixo**, v. 2, n. 2, p. 51, 2013.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Proceedings of the validation fórum on the global cassava development strategy. Global cassava market study**, Business opportunities for the use of cassava. v. 6, Rome, 2004.

FUKUDA, W. M. G.; FUKUDA, C.; VASCONCELOS, O.; FOLGAÇA, J. L.; NEVES, Haroldo Peso; CARNEIRO, Geovane Tadeu. Variedades de mandioca recomendadas para o Estados da Bahia. **Revista Bahia Agrícola**, v.7, n.3, p.27-30, 2006.

IBGE. Produção estimada da mandioca safra 2019 Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/busca.html?searchword=cultura+da+mandioca>. Acesso em 09 nov. 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2018. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro, RJ. 86p.

LAHAI, M. T.; EKANAYAKE, I. J.; KROMA, J. P. C. 2013. Influence of canopy structure on yield of cassava cultivars at various toposequences of an inland valley agro ecosystem. **Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development**. v. 5, n. 3, p. 36-47, 2013.

LOUREIRO, L. R. Caracterização do chorume segundo alguns parâmetros e aplicação do método de eletrofloculação. Monografia (Graduação em Química). Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.

MÓDENES, A. N.; ESPINOZA-QUINONES, F. R.; YASSUE, P. H.; PORTO, T. M.; THEODORO, P. S. Aplicação da técnica de eletrocoagulação no tratamento de efluentes de abatedouro de aves. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 571-578, 2017.

NASCIMENTO, R. C. **Tratamento de água para consume humano utilizando processo de eletrocoagulação**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental). Universidade da Paraíba - Centro de Tecnologia Civil e Ambiental, 2018.

NASSAR, N. M. A. Mandioca: opção contra a Fome. Estudos e lições no Brasil e no mundo. **Ci. Hoje**, v. 39, n. 231, p. 30-36, 2006.

ORSSATTO, F.; EWERLING, A.; DOMINGUES, M. D. A.; EYNG, Eduardo; TAVARES, Maria Hermínia Ferreira. Tratamento de efluente de uma lavanderia industrial por meio da eletrofloculação: uma opção para o reuso. **Espacios**, v. 37, n. 11, 2016.

PASCHOAL, F. M. M.; TREMILIOSI-FILHO, G. Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais. **Química Nova**, v. 28, n. 5, 2005, p.766-772.

SANTOS, D. V. **Tratamento de efluente de fecularia utilizando coagulação/floculação e separação por membranas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná –Centro de Engenharias e Ciências Exatas, 2016.

SCHLLEMER, M. A. **Preparação e caracterização de biofilmes à base de manipueira para imobilização de caulinita intercalada com ureia.** 2013. Dissertação (Mestrado em Tecnologia em Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.

STATSOFT, INC. Statistica (Data Analysis Software System). Versão 11.0. Disponível em: www.statsoft.com.

WANG, W; XIE, L; LUO, G; ZHOU, Q; LU, Q. Optimization of biohydrogen and methane recovery within a cassava ethanol wastewater/waste integrated management system. **Bioresource Technology**, v. 120, n. 1, p. 165-172, 2012.