

**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus de Medianeira
Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental**

**ALESSANDRO EWERLING
MAYKON DOUGLAS DO AMARAL DOMINGUÊS**

**EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE ELETROFLOCULAÇÃO NO
TRATAMENTO DO EFLUENTE DE UMA LAVANDERIA INDUSTRIAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA

2014

**ALESSANDRO EWERLING
MAYKON DOUGLAS DO AMARAL DOMINGUÊS**

**EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE ELETROFLOCULAÇÃO NO
TRATAMENTO DO EFLUENTE DE UMA LAVANDERIA INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso, Apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de tecnologia em Gestão Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Medianeira, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo Ambiental.

Orientador: Prof. *MSc* Fábio Orssatto
Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Eyng

MEDIANEIRA

2014



TERMO DE APROVAÇÃO

EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE ELETROFLOCULAÇÃO NO TRATAMENTO DO EFLUENTE DE LAVANDERIA INDUSTRIAL

ALESSANDRO EWERLING
MAYKON DOUGLAS DO AMARAL DOMINGUÊS

Este Trabalho de Conclusão de Curso – TCC foi apresentado em 25 de Novembro de 2014, como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo no Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Medianeira. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após a deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. *MSc* Fábio Orssatto
Orientador

Prof. Dr. Eduardo Eyng
Co-orientador

Prof. Dr. Laercio M. Frare
Membro Titular

Prof. Dr. Rafael Arioli
Membro Titular

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus, por nos ter concebido o dom de viver e poder correr atrás daquilo que almejamos, e estar ao nosso lado todo tempo, nos protegendo e iluminando, pois tudo é vindo das mãos de Deus.

Agradecemos também aos nossos familiares pelo incansável apoio e incentivo, para que tivéssemos uma boa formação profissional. Nossos primeiros e eternos provedores de conhecimentos, torcedores vibrantes de nossas vitórias e consoladores das “não” vitórias.

As nossas namoradas Nielen e Patrícia, que são nossas companheiras e estão ao nosso lado todo o tempo, e de forma direta e indiretamente nos auxiliaram nesse trabalho.

Aos colegas, amigos, companheiros, que nos proporcionaram conhecer novas culturas, discutir ideias, distrair um pouco, incentivar nos momentos difíceis, pois a vida acadêmica não é fácil não.

Ao professor Fábio Orsatto, pelos ensinamentos, conselhos, compartilhamento de seus conhecimentos e oportunidades oferecidas. Foi um logo tempo de trabalho e convívio que nos trouxeram aprendizado e experiência que contribuiu para nosso aprendizado.

Agradecemos a todos professores do Curso de Tecnologia em Gestão ambiental, pela dedicação, orientação, paciência em transmitir seus conhecimentos, para nossa formação, que levaremos não só como futuros gestores ambientais, mais pelo resto da vida.

*“Só quando a última árvore for derrubada,
O último peixe for morto e o último rio for poluído,
É que o homem perceberá que não pode comer dinheiro”.*

(Proverbio Indígena).

RESUMO

EWERLING, Alessandro; DOMINGUÊS, Maykon D. do A. **Eficiência do processo de eletrofloculação no tratamento de efluente de uma lavanderia industrial.** 2014, 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2014.

Este trabalho constituiu-se em verificar a eficiência da técnica de eletrofloculação no tratamento do efluente de uma lavanderia industrial, localizada na cidade de Medianeira no estado do Paraná. O setor de lavagem de roupas é caracterizado pelo alto consumo de água, e impactos causados pelo descarte inadequado de seus efluentes, que contém uma diversidade de compostos. A lavanderia em estudo consome em média $4.032.000 \text{ L.dia}^{-1}$ de água nos 3 procedimentos de lavagem que são realizados, onde o efluente gerado é descartado no sistema de tratamento da empresa. Primeiramente foi realizada análises preliminares do efluente composta dos procedimentos de lavagens, onde foram constatados valores elevados nos seguintes parâmetros: DQO, fósforo, cor e turbidez, que foram os parâmetros em estudo para verificar a eficiência do processo eletrolítico. Foi utilizado o Delineamento Composto Central Rotacional, para avaliar os fatores ddp e tempo de retenção hidráulica, e para mostrar os resultados foi utilizado modelo estatístico ANOVA, onde chegou-se à conclusão que o processo eletrolítico obteve eficiência neste tipo de efluente, com percentual de redução 87,5% para DQO, 93,6% para cor, 83,1% de turbidez. Para o parâmetro fósforo segundo a ANOVA, o modelo não foi válido por um provável erro de análise no ensaio 9, mas observando os outros ensaios, pode-se perceber que houve eficiência do efluente tratado em relação ao efluente bruto, com um percentual de 98,6%.

Palavras-chave: Tratamento Eletroquímico. Eletrocoagulação. Tratamento Físico-Químico.

ABSTRACT

EWERLING, Alessandro; DOMINGUÊS, Maykon D. do A. **Efficiency of the eletrofloculação process in treating wastewater of an industrial laundry.** 2014, 57 f. Completion of Course Work – Federal Technology University of Paraná. Medianeira, 2014.

This work consisted in checking the efficiency of the technique of eletrofloculação in the treatment of the effluent of an industrial laundry, located in the town of Medianeira in Paraná State. Washing clothes sector is characterized by the high consumption of water, and impacts caused by the inappropriate disposal of their wastewater, which contains a variety of compounds. Laundry in study on average consumes 4,032,000 l. day⁻¹ of water in 3 washing procedures that are performed, where the effluent generated is thrown in the treatment system of the company. First was performed preliminary analyses of wastewater composed of wash procedures, where high values were found in the following parameters: DQO, phosphorus, colour and turbidity, which were the parameters under study to verify the efficiency of the electrolytic process. Central Composite Design was used to evaluate Rotational factors ddp and hydraulic retention time, and to show the results ANOVA statistical model was used, where it was concluded that the electrolytic process obtained efficiency in this type of effluent, with percentage of 87.5% reduction for COD, 93.6% to 83.1% turbidity, color. For the parameter match according to ANOVA, the model was not valid for a probable parse error at rehearsal 9, but watching the other essays, one can realize that there was efficiency of treated effluent in relation to the raw sewage, with a percentage of 98.6%.

Keywords: Electrochemical Treatment. Electrocoagulation. Physical-Chemical Treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Interações dentro de um reator de eletrocoagulação	20
Figura 2	Fluxograma dos processos da lavanderia em estudo	28
Figura 3	Superfície de resposta (3D) para remoção da DQO	40
Figura 4	Superfície de resposta para remoção da DQO	40
Figura 5	Superfície de resposta (3D) para remoção da Cor	48
Figura 6	Superfície de resposta para remoção da Cor	48
Figura 7	Superfície de resposta (3D) para remoção de Turbidez	52
Figura 8	Superfície de resposta para remoção de turbidez	53

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1	Balde de coleta	25
Fotografia 2	Efluente em embalagens plásticas de 1 L	26
Fotografia 3	Máquina de lavagem	26
Fotografia 4	Máquina de lavagem	27
Fotografia 5	Ponto de coleta	27
Fotografia 6	Roupas utilizadas pelos funcionários	28
Fotografia 7	Módulo experimental de eletrofloculação	30
Fotografia 8	Eletrôdos de sacrifício	31
Fotografia 9	Amostra após eletrofloculação com eletrôdo de alumínio (esquerda), eletrôdo de ferro (direita)	32
Fotografia 10	Amostra após 10 minutos de repouso	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Representação de remoção da DQO do efluente tratado em relação ao efluente bruto	37
Gráfico 2	Representação gráfica do percentual de eficiência na remoção da DQO	37
Gráfico 3	Gráfico de Pareto da DQO	38
Gráfico 4	Representação de remoção do Fósforo do efluente tratado em relação ao efluente bruto	41
Gráfico 5	Representação gráfica do percentual de eficiência na remoção do Fósforo	42
Gráfico 6	Gráfico de Pareto do fósforo	43
Gráfico 7	Representação de remoção da Cor do efluente tratado em relação ao efluente bruto	45
Gráfico 8	Representação gráfica de remoção da Cor	45
Gráfico 9	Gráfico de Pareto da Cor	46
Gráfico 10	Representação de remoção de turbidez do efluente tratado em relação ao efluente bruto	49
Gráfico 11	Representação gráfica do percentual de eficiência na remoção de turbidez	50
Gráfico 12	Gráfico de Pareto da Turbidez	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Consumo de água por tipo de roupa	29
Tabela 2	Produtos e composição química, utilizado na lavagem das roupas	29
Tabela 3	Matriz do delineamento experimental	32
Tabela 4	Níveis estudados para as variáveis independentes	33
Tabela 5	Análises e métodos utilizados	35
Tabela 6	Eficiência na remoção de DQO	36
Tabela 7	ANOVA da DQO	38
Tabela 8	ANOVA para modelo de remoção da DQO	39
Tabela 9	Coefficientes de regressão para a remoção da DQO	39
Tabela 10	Eficiência na remoção de Fósforo	41
Tabela 11	ANOVA do fósforo	42
Tabela 12	Coefficiente de regressão para a remoção do Fósforo	43
Tabela 13	Eficiência na remoção de Cor	44
Tabela 14	ANOVA da cor	46
Tabela 15	ANOVA para modelo de remoção da Cor	47
Tabela 16	Coefficientes de regressão para remoção da Cor	47
Tabela 17	Eficiência de remoção da turbidez	49
Tabela 18	ANOVA da turbidez	50
Tabela 19	ANOVA para modelo de remoção de turbidez	51
Tabela 20	Coefficientes de regressão para a remoção de turbidez	52

LISTA DE ABREVIATURAS

ANOVA	Análise de Variância
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
ddp	Diferença de potencial
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EF	Eletrofloculação
g	Gramas
L/dia ⁻¹	Litros por dia
mg/L ⁻¹	Miligramas por litro
pH	Potencia Hidrogeniônico
PR	Paraná
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SIGLAS

Al(OH)_3	Hidróxido de Alumínio
Al^{3+}	Alumínio
Cl_2	Gás Cloro
H_2	Hidrogênio
NaCl	Cloreto de Sódio
L	Linear
Q	Quadrático
x_1	Diferença de potencial
x_2	Tempo
O_2	Oxigênio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 LAVANDERIAS INDUSTRIAIS.....	17
2.2 EFLUENTE DE LAVANDERIA INDUSTRIAL.....	17
2.3 IMPACTOS CAUSADOS PELOS EFLUENTES DE LAVANDERIAS	18
2.4 ELETROFLOCULAÇÃO.....	19
2.4.1 Principais Etapas e Reações Envolvidas na EF	21
2.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA (EF).....	22
2.5.1 Vantagens da EF.....	22
2.5.2 Desvantagens da EF	23
2.6 APLICAÇÕES E EFICIÊNCIA DA ELETROFLOCULAÇÃO.....	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA LAVANDERIA EM ESTUDO.....	25
3.1.1 Produtos Químicos Utilizados para Lavagem dos Uniformes.....	29
3.2 MÓDULO EXPERIMENTAL DO TRATAMENTO.....	30
3.2.1 Planejamento Experimental.....	32
3.2.2 Procedimento Experimental	33
3.3 PARÂMETROS AVALIADOS PARA COMPARAÇÃO DO EFLUENTE BRUTO E ELETROFLOCULADO	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO DE DQO.....	36
4.2 EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO DE FÓSFORO	41
4.3 EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO DA COR.....	44
4.4 EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO DE TURBIDEZ	49
5 CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento industrial e o crescimento acelerado da população o consumo de água tem aumentado. E como consequência, os recursos hídricos vêm sofrendo grandes impactos, pois a água usada de forma *in natura* pelas indústrias retorna ao seu habitat natural como efluente líquido, podendo ser uma potencial fonte poluidora se não houver tratamento adequado.

Sabe-se que a água é o elemento mais importante para a vida humana, pois compõe de 60 a 70% do nosso peso corporal, é essencial para todas as funções orgânicas, regula a nossa temperatura interna, além de utilizarmos nas atividades do dia-a-dia. Desta forma, com o crescimento populacional e o desenvolvimento industrial, percebe-se cada vez mais o consumo elevado da mesma em processos industriais, gerando um grande volume de efluentes altamente poluidores, pois estes contêm elementos de difícil ou impossível degradação natural. Por isso a importância de uma legislação rígida, exigindo das indústrias e outras atividades potencialmente geradoras de poluição, o tratamento dos efluentes e o desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis. (QUEIROZ, 2010).

O uso porcentual de água está assim distribuído no Brasil: 43% da água é classificada como de uso doméstico, 40% destina-se a agricultura e 17% é utilizada na indústria. A indústria, além de ocupar o terceiro lugar no consumo de água, é um agente potencialmente gerador de impactos ambientais (CRESPILHO & REZEDE 2004).

Pode-se notar uma preocupação das indústrias brasileiras em gerar efluentes industriais, que atendam aos critérios de descarte da Legislação CONAMA nº 430 (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

Estima-se que no ano de 2050 entre $1,0 \times 10^9$ e $2,4 \times 10^9$ pessoas viverão em países com recursos de água escassos. A água limpa do planeta caminha para assumir o papel que tinha o petróleo em 1973: uma *commodity* em crise, com potencial para lançar a economia mundial num estado de choque. Nem o Brasil, privilegiado com 12% da água doce corrente mundial, vai escapar do estresse hídrico do planeta (LORA, 2002).

Os tratamentos de efluentes industriais envolvem processos destinados a remoção de impurezas geradas na fabricação de produtos de interesse. Os métodos

de tratamento estão diretamente associados ao tipo de efluente gerado, ao controle operacional da indústria e as características da água utilizada. Dentre os vários processos podem-se destacar os tratamentos físicos, químicos e biológicos. Muitos dos processos utilizados em estações de tratamento de efluentes envolvem agentes coagulantes que podem causar impactos ambientais (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

BORBA *et al* (2010), afirma que a técnica da eletrofloculação desperta muito interesse devido à sua simplicidade de operação, além de apresentar possibilidades de tratamento para uma grande variedade de efluentes. A EF vem desempenhando papel importante entre as técnicas não convencionais de tratamento de água e efluentes industriais. E isso se deve a sua versatilidade, tanto no modo operacional quanto na eficiência da remoção de contaminantes (CRESPILHO & REZENDE 2004).

A tecnologia de tratamento físico-químico pelo processo eletrolítico é uma alternativa promissora para o atendimento à legislação ambiental. Esta alternativa possibilita ampliar a capacidade de tratamento dos sistemas tradicionais, pois utiliza os mesmos fundamentos básicos de coagulação-floculação e adicionalmente disponibiliza elementos que potencializam o método pela geração de oxigênio e hidrogênio nas reações de eletrólise, formando um fluxo ascendente de microbolhas que interagem com todo o efluente presente no interior do reator eletrolítico, sendo este submetido intensamente às reações de oxidação e redução, facilitando a floculação e a flotação da carga poluidora existente, aumentando a eficiência do processo de tratamento (SILVA, 2002).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo, avaliar o desempenho da técnica de eletrofloculação como tratamento de um efluente de lavanderia industrial.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 LAVANDERIAS INDUSTRIAIS

O ramo de lavagem de roupas é um importante setor de serviços na sociedade moderna e responsável por uma parcela significativa no consumo de água no meio urbano (MENEZES, 2005).

Existem cerca de 6.000 lavanderias no Brasil, as quais se encontram subdivididas de acordo com o setor em que atuam. Como cada setor tem sua própria especialidade ou produto a ser trabalhado, essas lavanderias seguem processos diferenciados. São elas: lavanderias de jeans (confecções), lavanderias hospitalares, lavanderias de hotel, motel e restaurante, lavanderias de roupas profissionais, lavanderias de panos industriais e lavanderias de equipamentos de proteção individual (ROCHA e SOBRAL, 2012).

Para o processo de lavagem de roupas são aplicados métodos conhecidos como “métodos de várias águas de sabão”. As máquinas empregadas são geralmente de formato cilíndrico e montadas horizontalmente. Os componentes a serem lavados são inseridos dentro deste cilindro com água, detergente e outras substâncias de lavagem. O movimento rotativo do equipamento produz agitação necessária para libertar ou dissolver sujeiras. Este método exige uma determinada carga de roupas no aparelho, uma série de ensaboaduras e enxágues bem como outras operações (MENEZES, 2005).

2.2 EFLUENTE DE LAVANDERIA INDUSTRIAL

As exigências de cuidado com a água que as lavanderias descartam são dirigidas através de regulamentação do CONAMA, em nível federal, e dos órgãos responsáveis, em nível estadual e municipal. São essas leis que determinam a classificação dos tipos de águas existentes e dos critérios de qualidade do efluente na hora de seu descarte. Esses parâmetros estabelecem as quantidades de substâncias

aceitas nesse efluente quando ele é despejado na rede pública de esgoto ou no leito de algum rio (OLIVEIRA, 2008).

As águas residuais apresentam volumes significativos os quais contém uma diversidade de compostos. Entre esses se pode mencionar tensoativos, amaciantes, alvejantes, tinturas, fibras de tecidos, enzimas, gomas e contaminantes diversos. Desta forma, o efluente gerado apresenta carga orgânica, coloração, baixa tensão superficial e quantidade significativa de sólidos suspensos (MENEZES, 2005).

2.3 IMPACTOS CAUSADOS PELO EFLUENTES DE LAVANDERIAS

As lavanderias são caracterizadas pelo consumo excessivo de água, e impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de seu efluente. Para que a limpeza das roupas seja eficiente, uma variedade de produtos químicos são utilizados, no qual se destacam os sabões e detergentes.

Antes mesmo do aparecimento dos produtos sintéticos, o sabão já apresentava o problema de deixar as águas muito alcalinas (duras), deixando também uma película insolúvel sobre a superfície da água. Na década de 1960, foram elaboradas leis na Europa para limitar a grande quantidade de espuma que geravam os detergentes sintéticos (JURAN, 2006).

Atualmente, os níveis de fosfatos nos detergentes são controlados por lei. Entretanto, o acúmulo dessas substâncias nos rios, pode prejudicar a vida das plantas e animais que vivem nestes locais. Isto porque formam uma espuma branca ("cisne-de-detergente") que reduz a penetração do oxigênio do ar na água, diminuindo assim o oxigênio disponível para respiração desses seres. Os fosfatos também favorecem a multiplicação de algas vermelhas, que em excesso também prejudicam a oxigenação da água (CONPET, 2006).

Os aditivos sintéticos usados nesses produtos são os conservantes. Estes são substâncias acrescentadas em pequenas quantidades nos produtos de limpeza para garantir a durabilidade dos mesmos. Geralmente são: antioxidantes, que impedem a oxidação; os antissépticos que protegem das contaminações microbianas no processo de fabricação e utilização, e os fungicidas, que impedem a proliferação de mofo e fungos. Eles podem ser naturais ou sintéticos, embora a maioria das empresas opte

pelos sintéticos pela facilidade de manuseio e preço, mas estes podem trazer danos à saúde, em longo prazo. (CASTROVIEJO, 2006).

2.4 ELETROFLOCULAÇÃO

No final do século XIX, a EF já era bem conhecida. Embora pouco explorada, foi considerada uma técnica promissora. Durante o século XX, algumas plantas piloto de eletro-flotação começaram a ser estudadas, mas logo foram abandonadas em decorrência da complexidade das etapas que envolvem processos hidrodinâmicos acoplados a sistemas eletroquímicos. Vários fenômenos relacionados aos processos de coagulação via eletroquímica já são bem conhecidos e podem ser aplicados a modelos hidrodinâmicos (FORNARI, 2007).

Na tecnologia de eletrofloculação não ocorre à adição de floculantes, o que evita a formação de lodo residual. Trata-se de um processo eletroquímico baseado na geração de bolhas de gás (geralmente O_2 e H_2), substituindo os aditivos floculantes. Esse processo é dividido em quatro etapas básicas: (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 (PASCHOAL; TREMILIOSI-FILHO, 2005).

A EF vem desempenhando um papel importante entre as técnicas não convencionais de tratamento de águas e efluentes industriais. E isso se deve a sua versatilidade, tanto no modo operacional quanto na eficiência de remoção de contaminante (CRESPILO e REZENDE, 2004). De acordo com LOUREIRO (2008), a eletrofloculação desempenha papel importante nas técnicas não convencionais de tratamento de águas e efluentes industriais. O que ocorre é que, poucos estudos foram conduzidos na aplicação de métodos pela técnica de processo eletroquímico. Entretanto, no processo de eletrofloculação não há necessidade de adicionar floculantes, evitando a formação do lodo residual.

SILVA (2005), explica que a EF ocorre através da passagem da corrente elétrica entre os eletródos que devem estar submersos em meios aquosos, distribuídos paralelamente no interior do reator, desenvolvendo assim diversas

reações como coagulação, floculação, oxidação, flotação e decantação dos contaminantes em suspensão. O autor explica que:

“No interior do reator, durante a realização do tratamento, reações anódicas e catódicas provocam a dissociação das moléculas da água, liberando íons e gases (oxigênio e hidrogênio), que são fundamentais para a dinâmica do processo. As hidroxilas geradas se associam aos íons liberados pela oxidação do metal que compõe o eletrodo (Al ou Fe), formando hidróxidos insolúveis, coloides que potencializam o desenvolvimento da floculação. Essas reações são processadas em pH adequado e os gases nascentes evoluem em direção ao topo movimentando o conteúdo do reator, carregando os poluentes, suspensão e formando uma espessa espuma”.

O processo de EF segue as ideias dos processos de flotação convencional, onde há remoção de partículas suspensas através da adsorção de pequenas bolhas gasosas, reduzindo a densidade de tais partículas de modo que elas flitem (FORNARI, 2007; TWARDOKUS 2004). A eletrofloculação é um processo que envolve a geração de coagulantes *"in situ"* pela dissolução de íons de alumínio e/ou ferro a partir, respectivamente, de eletródos de ferro ou alumínio pela ação de corrente elétrica aplicada. A geração de íons metálicos ocorre no ânodo, enquanto o gás hidrogênio surge no cátodo, como ilustrado na Figura 1.

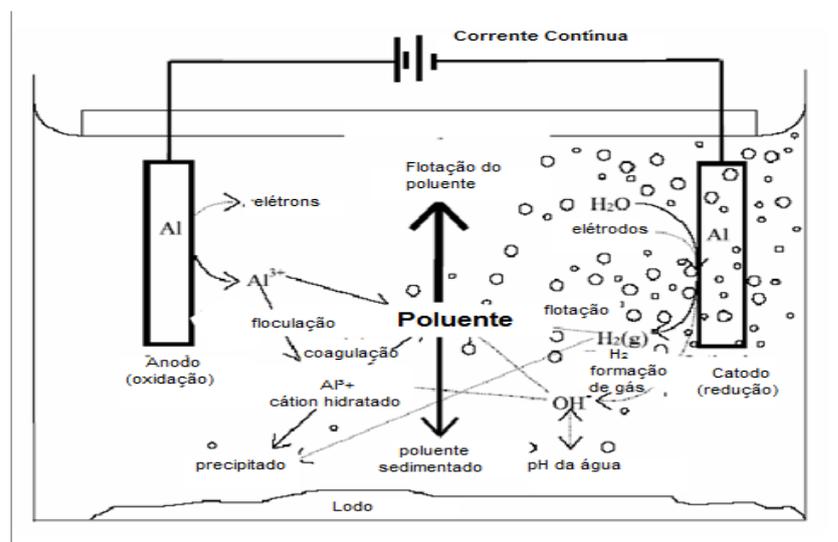


Figura 1 - Interações dentro de um reator de eletrocoagulação

Fonte: Holt *et al* (2002)

Em decorrência do potencial aplicado, microbolhas de hidrogênio podem ser formadas no cátodo. As partículas são acarretadas pelas microbolhas geradas no interior do reator. Ao chegar à superfície do reator a suspensão (flotado) pode ser removida por processos convencionais, tais como: raspagem, sucção (CRESPILHO e REZENDE, 2004).

2.4.1 Principais Etapas e Reações Envolvidas na EF

Segundo CRESPILO e REZENDE (2004), a EF ocorre basicamente em quatro etapas: geração eletroquímica do agente coagulante; adsorção, neutralização e varredura; eletrofloculação e flotação das impurezas.

Geração eletroquímica do agente coagulante: Esta etapa é determinante para que a coagulação ocorra de maneira controlada e eficiente. No caso da geração de Al^{3+} a partir de um ânodo de alumínio metálico, vários fatores devem ser considerados, como, por exemplo, a condutividade da solução, a resistividade do meio, o potencial aplicado entre os eletrodos e a corrente obtida. De modo geral, todos esses fatores estão relacionados entre si, uma vez controlados, a geração do agente coagulante passa a ser monitorada pela corrente obtida.

Adsorção, neutralização e varredura (eletrocoagulação): Nesta etapa ocorre a coagulação das partículas, ou seja, o alumínio carregado positivamente pode reagir com partículas de cargas negativas. Esse fenômeno ocorre para baixas concentrações de alumínio. Entretanto essa reação pode ficar limitada pela hidrólise da espécie carregada, liberada em grande quantidade pelo eletrodo, que, por sua vez, é muito rápida. Assim a adsorção e a neutralização podem ocorrer, porém, seus efeitos são bem menos expressivos quando comparados com a ação do hidróxido de alumínio. Tendo isso em mente, é de grande interesse, nessa etapa do processo, que a hidrólise resulte em hidróxido de alumínio, $Al(OH)_3$, uma vez que esse composto será o maior responsável por remover as impurezas do efluente.

Eletrofloculação: Os complexos de hidróxido de alumínio (formados na etapa de geração eletroquímica dos íons alumínio) adsorvem-se em partículas coloidais, originando partículas maiores. Essa etapa também chamada de floculação, consiste em maior desestabilização do sistema, e os flocos formados podem ser removidos por decantação, filtração ou flotação.

Flotação da impurezas (eletroflotação): Em decorrência do potencial aplicado, microbolhas de hidrogênio podem ser formadas no cátodo. Caso o efluente contenha íons cloreto, pode-se formar Cl_2 no ânodo, que, na presença de água, poderá formar íons hipoclorito. Esse fato pode ser considerado como uma grande vantagem da EF, uma vez que os processos de geração de cloro podem ser otimizados tanto para participar da desinfecção da água como para eliminar odores indesejáveis.

2.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA (EF)

Segundo CRESPILO e REZENDE (2004), a seguir são numeradas algumas vantagens e desvantagens do uso da eletrofloculação no tratamento de efluentes.

2.5.1 Vantagens da EF

1. A EF requer equipamento simples e de fácil operação, em que a corrente e o potencial podem ser monitorados de maneira automatizada;
2. Há controle maior na liberação do agente coagulante, em comparação com os processos convencionais;
3. Os flocos formados são mais estáveis, podendo ser melhor removido por filtração;
4. O processo da EF remove as partículas coloidais menores, pois o campo elétrico aplicado promove mais rapidamente o contato entre elas, facilitando a coagulação;
5. O processo de EF limita o uso de substâncias químicas, minimizando conseqüentemente, o impacto negativo causado pelo excesso de xenobióticos lançados no ambiente, fato que acontece quando a coagulação química é empregada no tratamento de efluentes;

6. As bolhas de gás produzidas durante eletrólise podem levar o contaminante ao topo da solução, onde pode ser concentrado e removido mais facilmente, por flotação;
7. A cela eletrolítica de EF é eletricamente controlada, não necessitando de acessórios secundários, o que requer menos manutenção;
8. A técnica de EF pode ser usada convenientemente em áreas rurais onde a eletricidade não é disponível, desde que um painel solar seja acoplado à unidade.

2.5.2 Desvantagens da EF

1. Os eletródos precisam ser substituídos regularmente, caso sofram passivação;
2. O uso da eletricidade pode ser caro em alguns lugares;
3. Um filme de óxido impermeável pode ser formado no cátodo, conduzindo à perda da eficiência da unidade de EF;
4. É requerida alta condutividade do efluente.

2.6 APLICAÇÕES E EFICIÊNCIA DA ELETROFLOCULAÇÃO

Para GOOBI (2013), a técnica de eletrofloculação tem despertado bastante interesse, devido à sua simplicidade de operação e aplicação no tratamento de diversos tipos de efluentes: tratamento de água potável (SANFAN *et al.*, 1987; VIK *et al.*, 1984), descontaminação de águas subterrâneas (POON, 1997), tratamento de esgoto sanitário (WIENDL, 1998), remoção de águas residuais de restaurantes (CHEN *et al.*, 2000), refeitórios (XU, *et al.*, 2004), lavanderias (GE *et al.*, 2004), tratamento de efluentes da indústria de processamento de coco (CRESPILHO *et al.*, 2004), indústria de óleo (MOSTEFA e TIR, 2004; SANTOS *et al.*, 2006), remoção de íon fluoreto (SHEN *et al.*, 2003), remoção de polifenóis (CRESPILHO e REZENDE, 2004), tratamentos de efluentes de curtumes (MURUGANANTHAN *et al.*, 2004), de efluentes têxteis (CAN *et al.*, 2005; CERQUEIRA, 2006; CHEN *et al.*, 2005; KIN *et al.*, 2003; KOBYA *et al.*, 2003), recuperação de metais (CHEN, 2004), refino de óleo vegetal (ADHOUM e MONSER, 2004; INAN *et al.*, 2004), separação de partículas ultrafinas

(MATTESON *et al.*, 1995), remoção de flúor (DRONDINA e DRAKO, 1994; SHEN *et al.*, 2003), recuperação de corantes (PASCHOAL e FILHO, 2005), entre outros.

Um efluente de indústria têxtil foi tratado pelo método de eletrocoagulação utilizando eletródos de alumínio e íons por KOBAYA *et al.*, (2003). Os parâmetros avaliados foram as características do efluente como a condutividade e pH além da densidade da corrente e a turbidez do material. O melhor resultado encontrado foi a remoção em presença de pH ácido médio atingindo valores $\text{pH} < 6$, enquanto os íons mais eficientes estavam no modo neutro e alcalino médio. Os resultados mostraram ainda que o ferro é superior ao alumínio como material de eletródo, a partir da eficiência de remoção e consumo de energia.

CERQUEIRA e MARQUES (2011), verificaram o processo eletrolítico com corrente alternada no tratamento de água. O objetivo principal do estudo foi tratar o efluente de indústria de petróleo. Foram desenvolvidos testes de eletrofloculação e coagulação química. Os parâmetros investigados foram: remoção da carga orgânica, cor e turbidez. A partir dos resultados encontrados os autores concluíram que a EF apresenta potencial aplicabilidade, enquanto a coagulação química não foi muito bem sucedida.

BORBA *et al.*, (2010), avaliaram a eficiência do processo da eletrofloculação utilizando eletródos de alumínio para o tratamento de efluente de uma indústria avícola. Para estimar a eficiência do processo foram avaliados os parâmetros: descoloração, turbidez, condutividade e pH final. Os resultados encontrados foram significativos em condições experimentais de pH inicial 4, tempo de eletrólise de 20 minutos obteve-se redução de 99,4 e 97,6% da cor e turbidez respectivamente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA LAVANDERIA EM ESTUDO

O efluente foi coletado na lavanderia de uma indústria frigorífica, responsável pela lavagem dos uniformes dos funcionários, localizada no município de Medianeira, PR. Foram coletados 20 litros do efluente composta dos 3 procedimentos de lavagem, em um balde, como ilustrada na Fotografia 1.



Fotografia 1 - Balde de coleta

Após a coleta, o efluente foi transferido para embalagens plásticas de 1 litro, como ilustrado na Fotografia 2, e transportado em caixa térmica até o laboratório da UTFPR, onde foram armazenados no congelador para posteriores ensaios e análises.

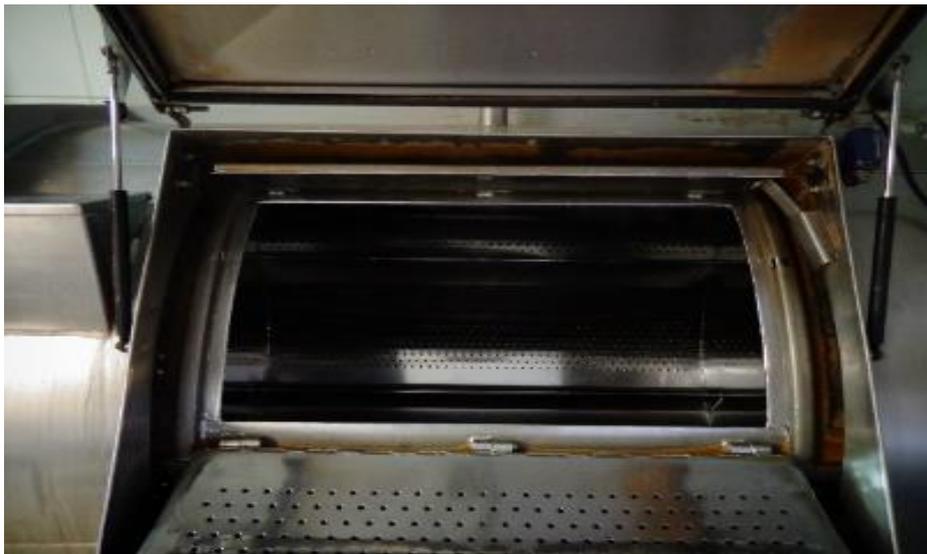


Fotografia 2 - Efluente em embalagens plásticas de 1L

A seguir nas Fotografias 3 a 5, imagens da máquina de lavagem onde foi coletado o efluente.



Fotografia 3 - Máquina de lavagem

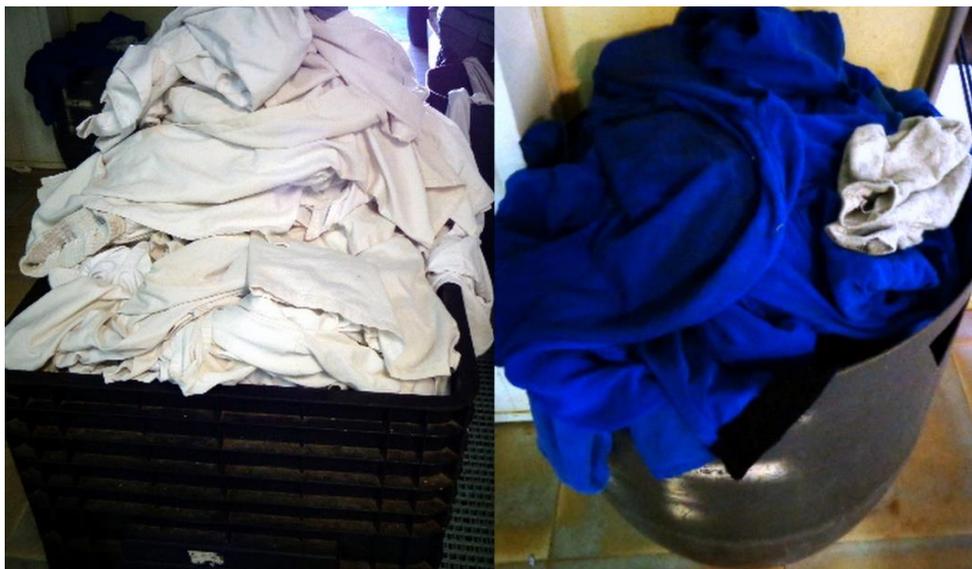


Fotografia 4 - Máquina de lavagem



Fotografia 5 - Ponto de coleta

Como a empresa possui vários setores, as roupas possuem diversos tipos de sujeiras, como graxas, sangue, gordura animal, corantes, terra, etc., a cada turno os funcionários recebem os uniformes limpos e no final do expediente deixam na lavanderia para serem limpos para o próximo dia, como ilustrado na Fotografia 6.



Fotografia 6 - Roupas utilizadas pelos funcionários

A lavanderia funciona 24 horas por dia, trabalhando de segunda a sábado, resultando em 588 horas trabalhadas mensais. Na Figura 2 é representado o fluxograma dos 3 procedimentos de lavagem.

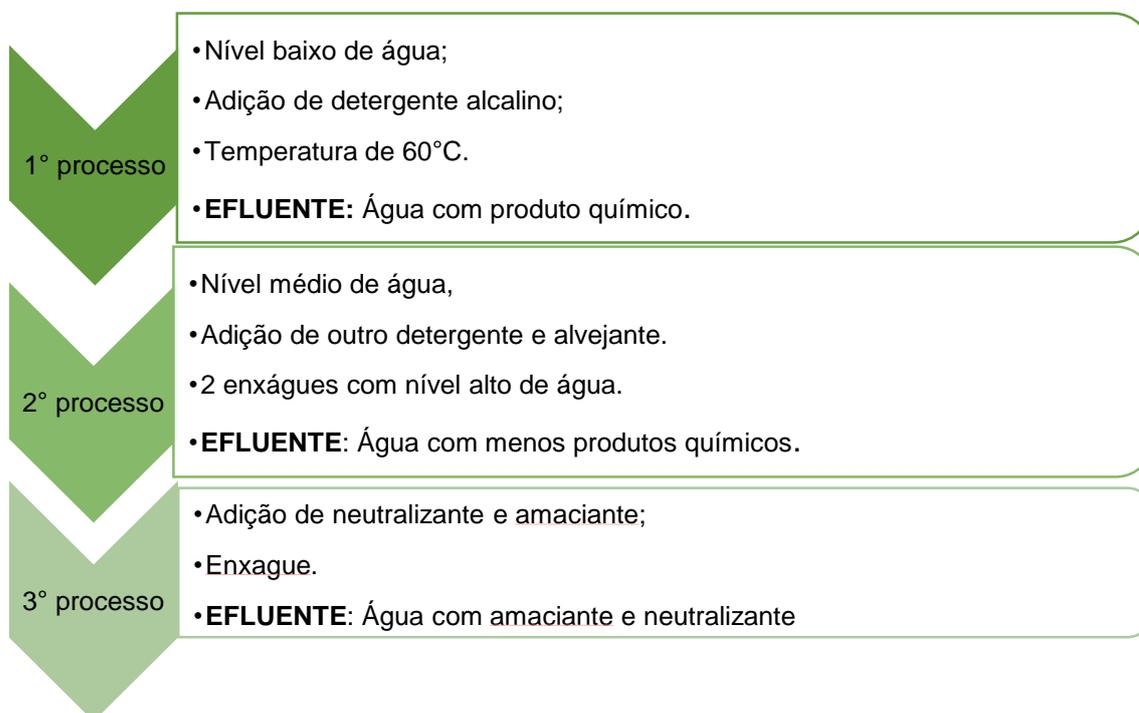


Figura 2 – Fluxograma dos processos da lavanderia em estudo

Para cada lavagem existe um nível de água a ser descartado. Destes, o nível baixo consome em média 250 litros e o nível alto em média 650 litros. São utilizados 100 kg de roupas para cada procedimento, que são executados conforme característica, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Consumo de água por tipo de roupa

Tipo de lavagem	Tempo	N° de lavagens nível baixo	N° de lavagens nível alto	Consumo de água por lavagem (litros)
Roupas Brancas	+/- 50 minutos	3	2	2.450
Roupas coloridas	+/- 45 minutos	3	1	2.200
Aventais e plásticos	+/- 30 minutos	2	1	1.550

A lavanderia realiza diariamente em média, 70 procedimentos de lavagem das roupas, sendo que uma máquina consome em média 2.400 L/dia⁻¹, totalizando 168.000 L/dia⁻¹. Considerando os dias trabalhados, por mês em média, 4.032.000 litros de efluente são descartados no sistema de tratamento da empresa.

3.1.1 Produtos Químicos Utilizados para Lavagem dos Uniformes

Para que o processo de lavagem retire todas sujidades dos uniformes, é necessária adição de diferentes tipos de produtos químicos para cada etapa de lavagem, listados a seguir na Tabela 2.

Tabela 2 – Produtos e composição química, utilizado na lavagem das roupas

(Continua)

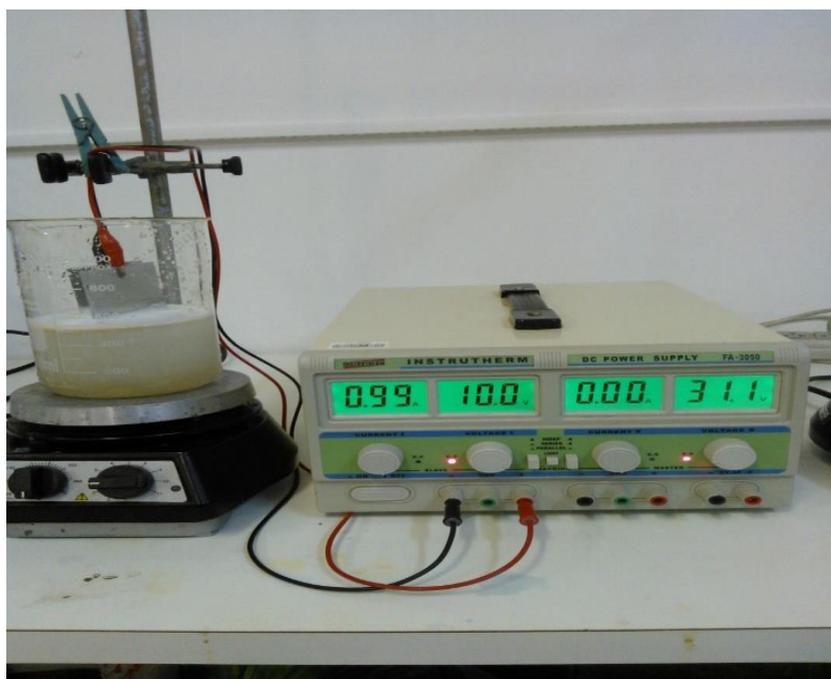
Produto	Composição química
Amaciante para todo tipo de tecido	Tensoativos catiônicos, solubilizantes, cloreto de dialquil dimetil amônio, coadjuvantes, corante, preservante, perfume e água
Removedor de manchas e alvejante de roupas de algodão e poliéster	Perborato de sódio, alcanizante e coadjuvantes

Tabela 2 – Produtos e composição química, utilizado na lavagem das roupas

Produto	Composição química
Usado na pré-lavagem e lavagem de roupas com sujidade pesada	Álcool alcoilado EP/PO, metacilicato de sódio, alcalinizante, agentes antirepositante e branqueadores ópticos
Usado para lavagem de roupas com sujidade leve ou pesada contendo óleos, gorduras de origem animal e vegetal, sujidade pigmentadas de sucos, chá, café, etc	Álcoois graxos etoxilados, alcalinizante, agente antirepositante, branqueador óptico, coadjuvante e sequestrante
Utilizado como neutralizante de resíduos dos alvejantes químicos e dos produtos alcalinos	Metabissulfito de sódio e coadjuvantes

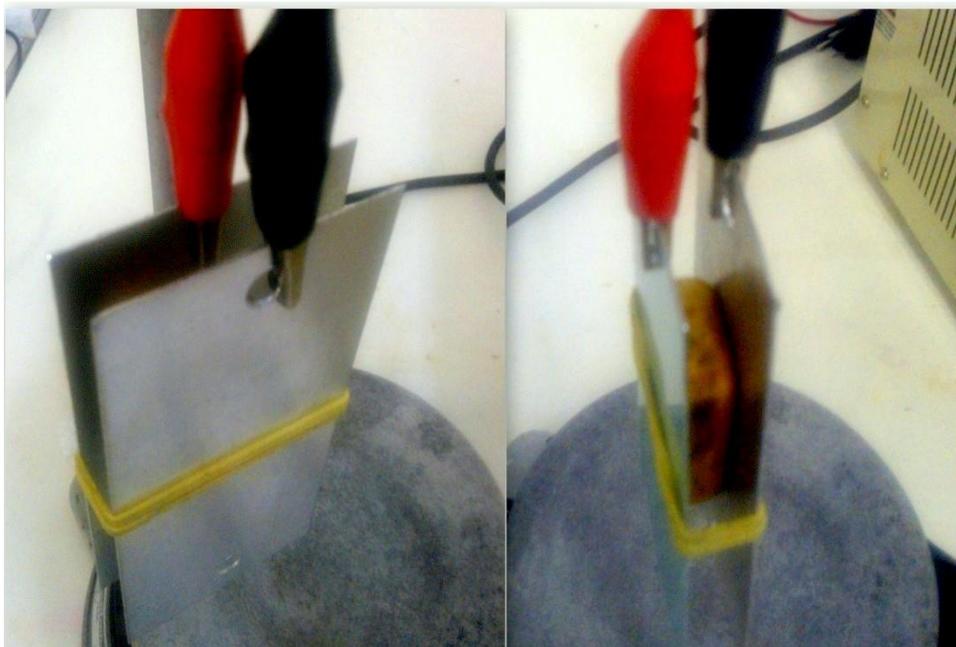
3.2 MÓDULO EXPERIMENTAL DO TRATAMENTO

Foi utilizado um reator em batelada de bancada (becker de 1L), onde foram inseridos eletródos de sacrifício conectados a uma fonte de corrente contínua (Fonte de alimentação Modelo FA – 3050, Marca: *Instrutherm*), juntamente com agitador magnético (Modelo 752A, Marca Fisatom) de modo a viabilizar a eletrofloculação, como ilustrado na Fotografia 7.



Fotografia 7 - Módulo experimental de eletrofloculação

Os eletrôdos de sacrifício escolhido foi de alumínio, com 10 cm de comprimento x 5 cm de largura e 0,6 mm de espessura, separados por um material não condutor de energia (borracha), como ilustrado na Fotografia 8.



Fotografia 8 – Eletrôdos de sacrifício

Para a escolha dos eletrôdos de sacrifício foi realizado um teste preliminar. Após o processo de eletrofloculação, houve uma mudança de cor no efluente com o eletrôdo de ferro, inviabilizando o processo, como ilustrado na Fotografia 9.



Fotografia 9 - Amostra após eletrofloculação com eletrôdo de alumínio (esquerda), eletrôdo de ferro (direita)

3.2.1 Planejamento Experimental

Foi utilizado o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), avaliando-se duas variáveis: diferença de potencial e tempo de retenção hidráulica. A partir do planejamento fatorial completo 2^2 obteve-se 4 ensaios. Então foram adicionados 4 pontos centrais e 4 pontos axiais para que fosse possível a obtenção do modelo quadrático, totalizando 12 ensaios realizados em duplicatas. Após testes preliminares, foi constatado a necessidade de ser adicionado em cada ensaio 1g de NaCl, para aumento da condutividade elétrica. A ddp e o tempo foram definidos a partir do DCCR, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz do delineamento experimental

Ensaio	(Continua)	
	Diferença de Potencial (volts)	Tempo de retenção hidráulica (minutos)
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1

Tabela 3 - Matriz do delineamento experimental

Ensaio	(Conclusão)	
	Diferença de Potencial (volts)	Tempo de retenção hidráulica (minutos)
4	1	1
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	-1,41	0
10	1,41	0
11	0	-1,41
12	0	1,41

A seguir na Tabela 4, estão expressos os valores referentes aos níveis estudados para os fatores: diferença de potencial e tempo de retenção hidráulica.

Tabela 4 – Níveis estudados para as variáveis independentes

Código	Diferença de Potencial (volts)	Tempo de retenção hidráulica (minutos)
-1,41	10	10
-1	12,91	12'55"
0	20	20
1	27,09	27'05"
1,41	30	30

3.2.2 Procedimento Experimental

Conforme o sorteio, iniciava-se o tratamento de EF, onde para cada ensaio foi utilizado 500 mL de efluente. A ddp e o tempo foram aplicados conforme definido na matriz de delineamento experimental, como ilustrado na Tabela 3.

Após a eletrofloculação, a amostra ficava em repouso por 10 minutos, para flotação e decantação dos poluentes. Para a realização das análises, a amostra do efluente tratado pelo processo eletrolítico, foi retirada do centro do becker com auxílio

de uma mangueira adaptada em uma seringa, por sucção, como ilustrado na Fotografia 10.



Fotografia 10 – Amostra após 10 minutos de repouso

3.3 PARÂMETROS AVALIADOS PARA COMPARAÇÃO DO EFLUENTE BRUTO E ELETROFLOCULADO

Todas as análises foram realizadas em duplicata, e consideradas apenas os valores médios entre elas. A seguir na Tabela 5, é descrito as análises e os métodos utilizados.

Tabela 5 – Análises e métodos utilizados

Análise	Método
DQO	Método titulométrico. Realizado em bateria de aquecimento (Marca Novatecnica, Modelo NT 347), e titulada com Sulfato Ferroso Amoniacal 0,25 M
Fósforo	Método amino. Realizado a leitura em espectrofotômetro (Modelo B 572A, Marca Micronal), no qual, o comprimento de onda usada foi de 690 nm.
Cor	Medida por absorvância. Realizada em espectrofotômetro (Marca Hach, Modelo DR 2800), no qual, o comprimento de onda usada foi de 465 nm
Turbidez	Método Nefelométrico, com turbidímetro (Marca Policontrol, Modelo AP 2000)

As análises de dados foram realizadas no Microsoft Excel, onde foram projetados os gráficos e as tabelas e cálculos realizados. E para verificar se o modelo foi válido, utilizou-se o suplemento de estatística ANOVA.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO DE DQO

A seguir na Tabela 6 e Gráfico 1, pode-se observar os resultados obtidos na remoção da DQO do efluente, tratado pelo processo eletrolítico. A média é referente ao ensaio em duplicata.

Tabela 6 – Eficiência na Remoção de DQO

Ensaio	Média DQO Efluente Tratado (mg/L ⁻¹)	DQO Efluente Bruto (mg/L ⁻¹)	Eficiência na remoção de DQO (%)
1	267,3	673,2	60,3
2	84,5	673,2	87,4
3	129,5	673,2	80,8
4	105,0	673,2	84,4
5	96,5	673,2	85,6
6	93,0	673,2	86,2
7	91,0	673,2	86,5
8	96,2	673,2	85,7
9	225,4	673,2	66,5
10	89,1	673,2	86,7
11	168,3	673,2	75,0
12	93,4	673,2	86,1

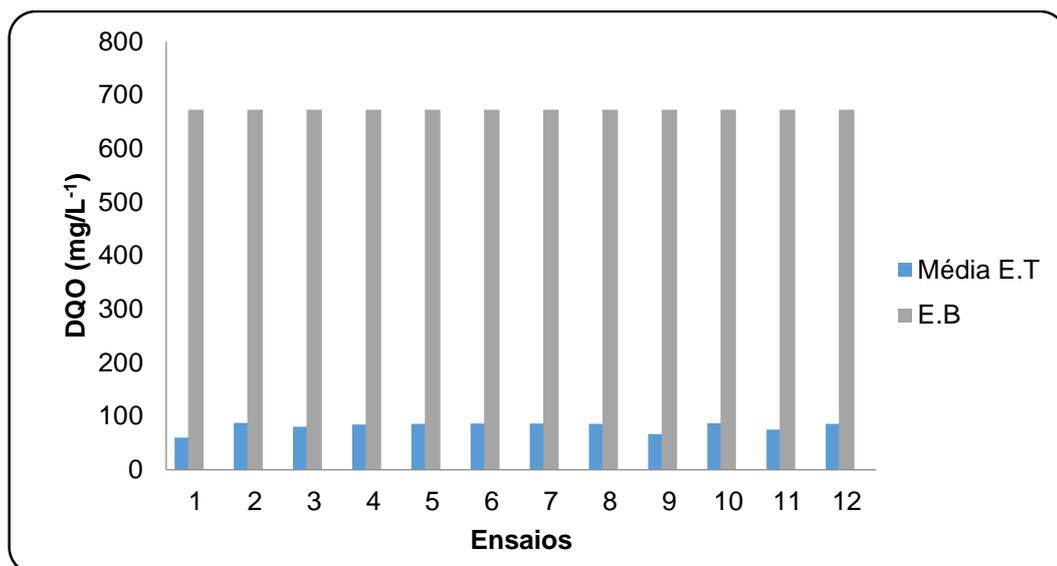


Gráfico 1 - Representação de remoção da DQO do efluente tratado em relação ao efluente bruto

A seguir no Gráfico 2, é apresentado a eficiência do processo eletrolítico nos ensaios, onde a maior foi 87,4% no ensaio 2, e a menor 60,3% no ensaio 1.

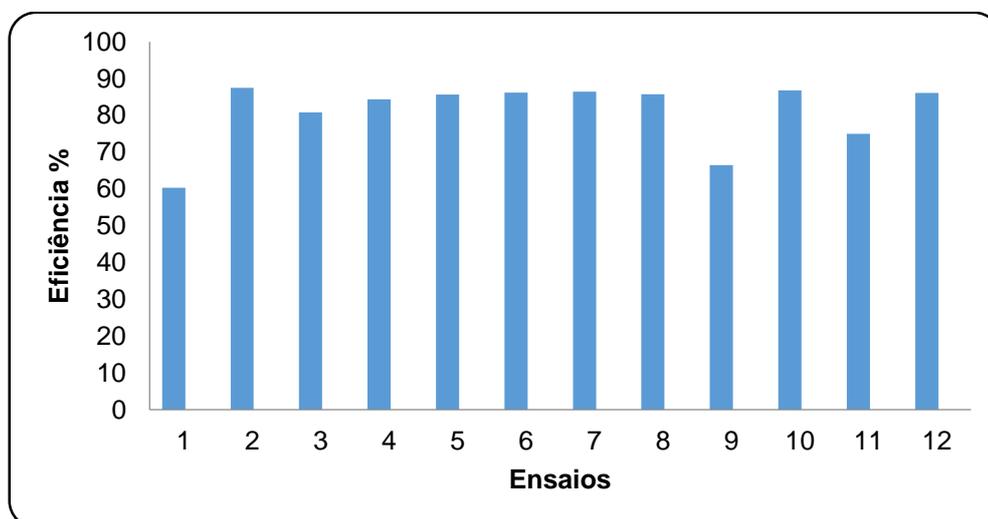


Gráfico 2 - Representação gráfica do percentual de eficiência na remoção de DQO

Na Tabela 7, pode-se verificar a análise de variância dos dados remoção da DQO.

Tabela 7 - ANOVA da DQO

Fatores	G.L.	SQ	QM	F _{calc}	p-valor
x ₁ (L)	1	440,98	440,98	966,26	7,36139x10 ⁻⁰⁸
x ₁ (Q)	1	126,71	126,71	277,63	2,98199 x10 ⁻⁰⁶
x ₂ (L)	1	162,58	162,58	356,23	1,42907 x10 ⁻⁰⁶
x ₂ (Q)	1	53,77	53,77	117,82	3,62254 x10 ⁻⁰⁵
x ₁ x ₂	1	127,49	127,49	279,35	2,92823 x10 ⁻⁰⁶
Resíduos	6	2,74	0,46		

Observa-se na ANOVA que todos os termos, lineares e quadráticos, e a interação entre o diferencial de potencial e o tempo de retenção hidráulica foram significativos, com 95% de confiança.

O gráfico de Pareto, representado a seguir pelo Gráfico 3, corrobora com as informações da Tabela 7.

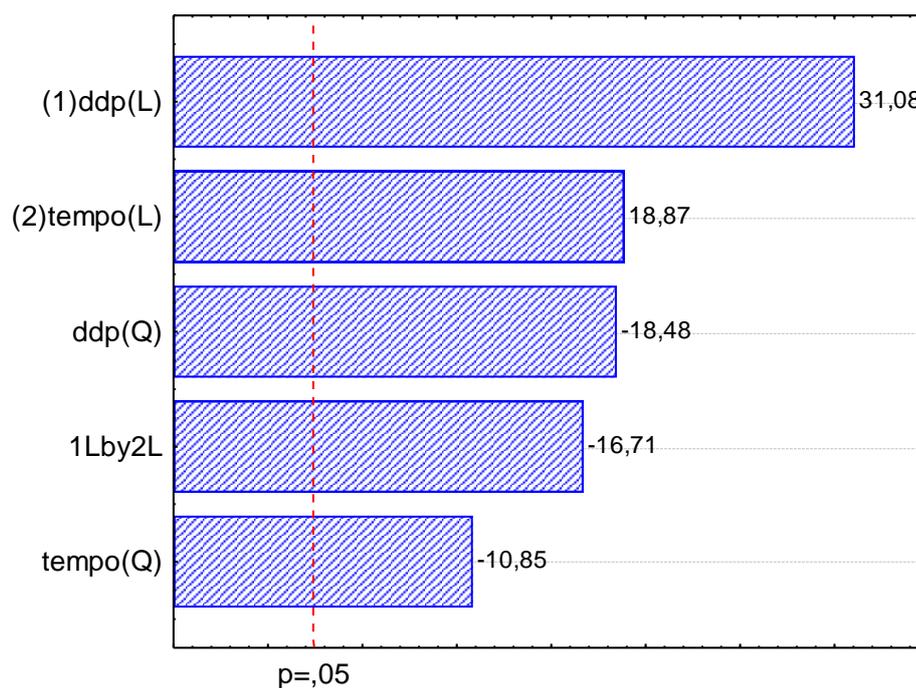


Gráfico 3 - Gráfico de Pareto da DQO

Na Tabela 8 a seguir, é apresentado a ANOVA para o modelo da remoção de DQO.

Tabela 8: Anova para modelo de remoção da DQO

Fonte de Variação	S.Q.	GL	QM	F _{calc}	F _{tab}	p-valor
Regressão	911,529	5	182,306	399,461	4,387	1,75719x10 ⁻⁰⁷
Resíduos	2,738	6	0,456			
Total		11				

Observando a Tabela 7, verifica-se que o F_{calc} para a regressão é altamente significativo ($399,461 > 4,387$). Dessa maneira, pode-se concluir que o modelo se ajusta bem aos dados experimentais.

A seguir na Tabela 9, são apresentados os coeficientes do modelo de regressão.

Tabela 9 - Coeficientes de regressão para a remoção da DQO

Fatores	Coeficientes de regressão
Média	85,55
x_1 (L)	7,44
x_1 (Q)	-4,95
x_2 (L)	4,51
x_2 (Q)	-2,91
$x_1 x_2$	-5,65

Através dos coeficientes, observa-se o modelo ajustado, também dito modelo completo ajustado pela equação 1.

$$\text{Remoção de DQO (\%)} = 85,55 + 7,44x_1 - 4,95x_1^2 + 4,51x_2 - 2,91x_2^2 - 5,65x_1x_2 \quad (\text{Eq. 1})$$

Como todos os parâmetros apresentaram alta influência sobre o resultado do ajuste final, nenhum coeficiente foi retirado da equação.

Com posse do modelo válido, gerou-se a superfície de resposta, ilustrado nas Figuras 3 e 4.

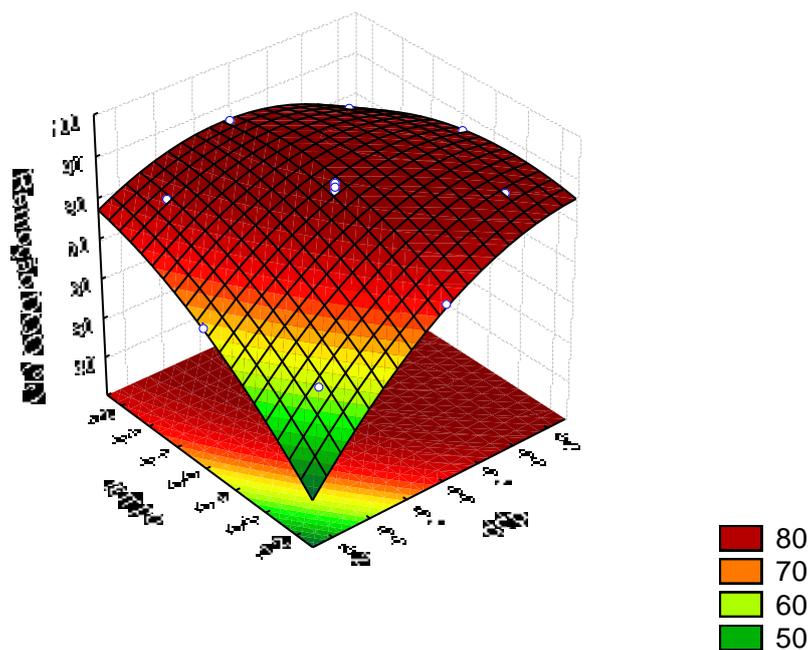


Figura 3 - Superfície de resposta (3D) para remoção da DQO

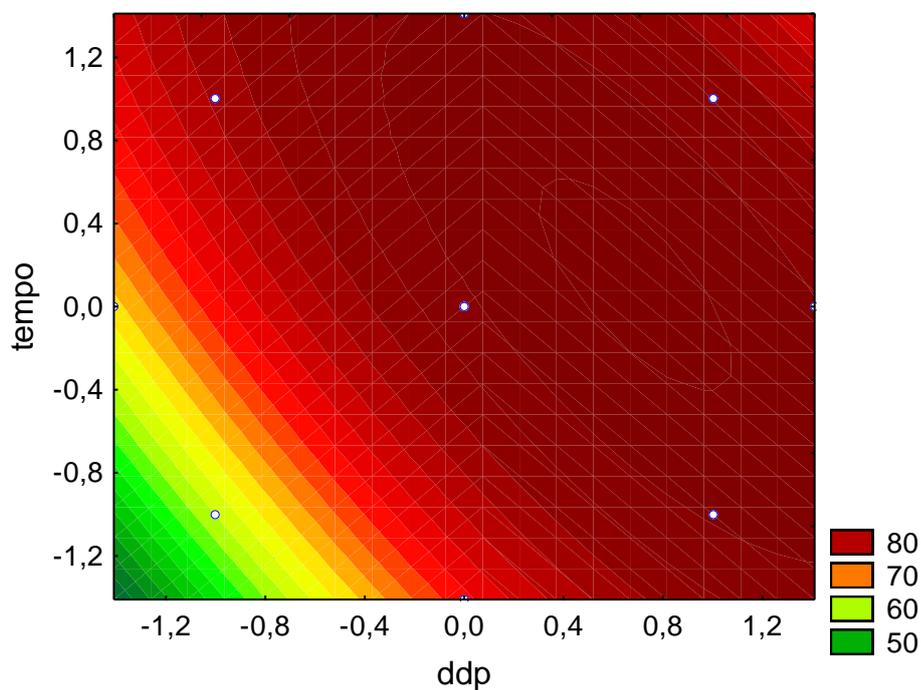


Figura 4 - Superfície de resposta para remoção da DQO

Ao analisar a superfície de resposta, ilustrados nas Figuras 3 e 4, observa-se que as melhores condições para a remoção de DQO estão próximas ao ponto central.

4.2 EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO DE FÓSFORO

A seguir na Tabela 10 e Gráfico 4, pode-se observar os resultados obtidos na remoção de Fósforo do efluente, tratado por eletrofloculação. A média é referente ao ensaio em duplicata.

Tabela 10 - Eficiência na remoção de Fósforo

Ensaio	Média Fósforo Efluente Tratado (mg/L ⁻¹)	Fósforo Efluente Bruto (mg/L ⁻¹)	Eficiência na remoção de Fósforo (%)
1	1,8	15,0	88,0
2	0,2	15,0	98,6
3	0,8	15,0	94,6
4	0,3	15,0	98,0
5	0,8	15,0	94,6
6	0,2	15,0	98,6
7	0,5	15,0	96,6
8	0,3	15,0	98,0
9	15,8	15,0	-5,3
10	0,2	15,0	98,6
11	0,6	15,0	96,00
12	0,5	15,0	96,6

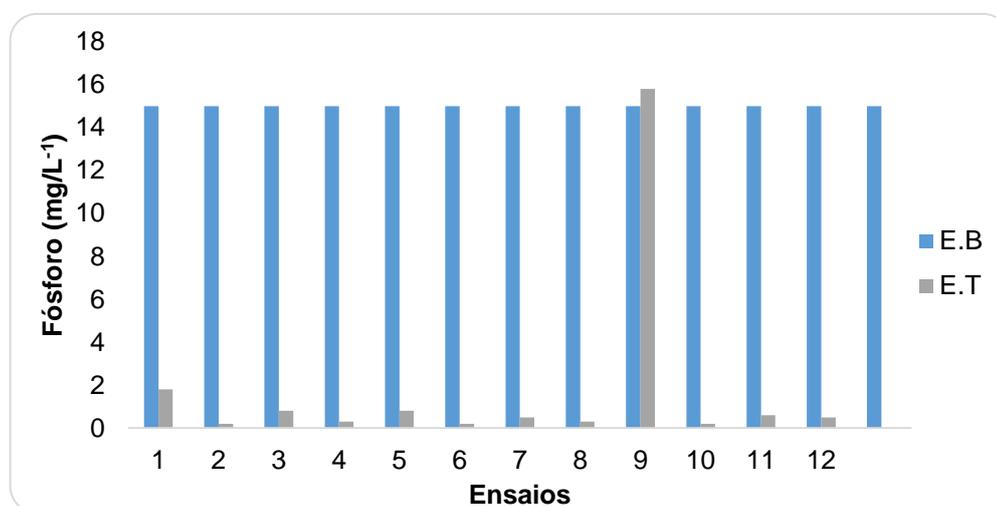


Gráfico 4 - Representação de remoção do Fósforo do efluente tratado em relação ao efluente bruto.

Ainda na Tabela 9 e Gráfico 4, pode-se notar um ensaio com valor negativo, no qual o motivo provavelmente foi erro de análise, e devido estar em cima do prazo de entrega do TCC, não foi possível repetir a análise.

A seguir no Gráfico 5, observa-se a eficiência do processo eletrolítico nos ensaios, onde a maior foi 98,6% nos ensaios 2, 6 e 10, e a menor foi 88%, no ensaio 1.

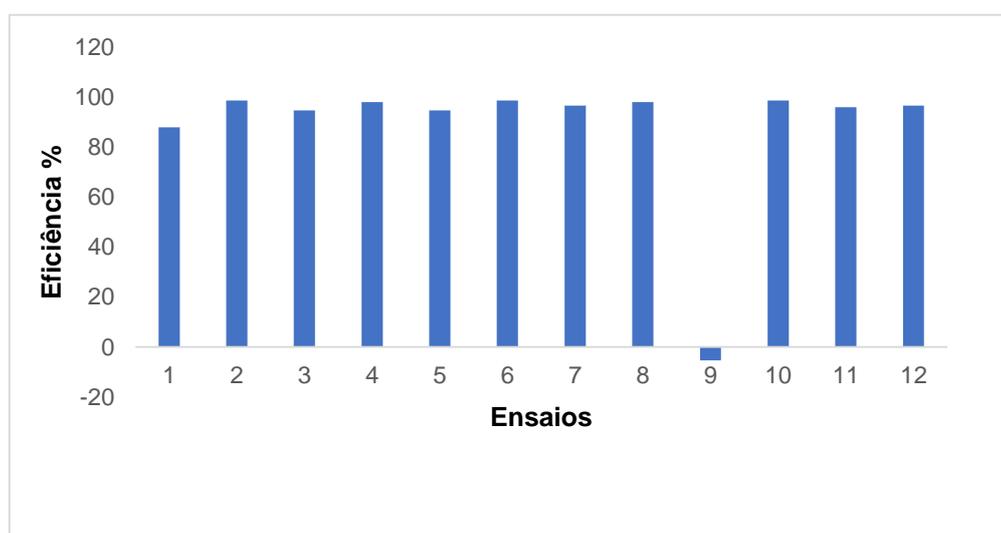


Gráfico 5 - Representação gráfica do percentual de eficiência na remoção do Fósforo

Na Tabela 11, pode-se verificar a análise de variância dos dados remoção de fósforo.

Tabela 11 - ANOVA Fósforo

Fatores	G.L.	SQ	QM	F _{calc}	p-valor
x ₁ (L)	1	3652,04	3652,04	6,64	0,042
x ₁ (Q)	1	3020,28	3020,28	5,49	0,057
x ₂ (L)	1	10,46	10,46	0,02	0,894
x ₂ (Q)	1	159,69	159,69	0,29	0,610
x ₁ x ₂	1	11,11	11,11	0,02	0,891
Resíduos	6	3296,71	549,45		

Observa-se na ANOVA que apenas o termo linear da ddp foi significativo, com 95% de confiança.

O gráfico de Pareto, representado a seguir pelo Gráfico 6, corrobora com as informações da Tabela 11.

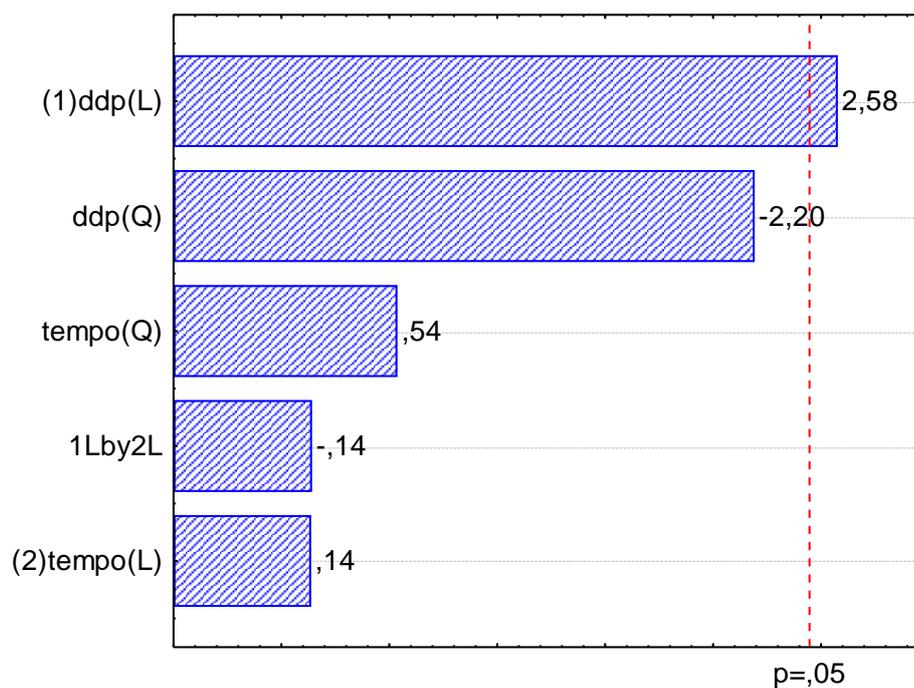


Gráfico 6 – Gráfico de Pareto do Fósforo

A Tabela 12 a seguir, é apresentado ANOVA para o modelo da remoção do Fósforo.

Tabela 12 - Coeficiente de regressão para a remoção do Fósforo.

Fonte de Variação	S.Q.	GL	QM	Fcalc	Ftab	p-valor
Regressão	6852,59	5	1370,52	2,494	4,387	0,148
Resíduos	3296,71	6	549,45			
Total		11				

Observando a Tabela 12, verifica-se que o F_{calc} para a regressão não é significativo ($2,49 < 4,387$). Dessa maneira, pode-se concluir que o modelo não se ajusta aos dados experimentais.

4.3 EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO DA COR

A seguir na Tabela 13 e Gráfico 7, pode-se observar os resultados obtidos na remoção de Cor do efluente, tratado pelo processo eletrolítico. A média é referente ao ensaio em duplicata.

Tabela 13 - Eficiência na Remoção de Cor

Ensaio	Média Cor Efluente Tratado (465 nm)	Cor Efluente Bruto (465 nm)	Eficiência na remoção de Cor (%)
1	393	1149	65,7
2	169	1149	85,3
3	120	1149	89,5
4	179	1149	84,4
5	106	1149	90,7
6	73	1149	93,6
7	74	1149	93,5
8	100	1149	91,2
9	285	1149	75,1
10	103	1149	91,0
11	175	1149	84,7
12	185	1149	83,8

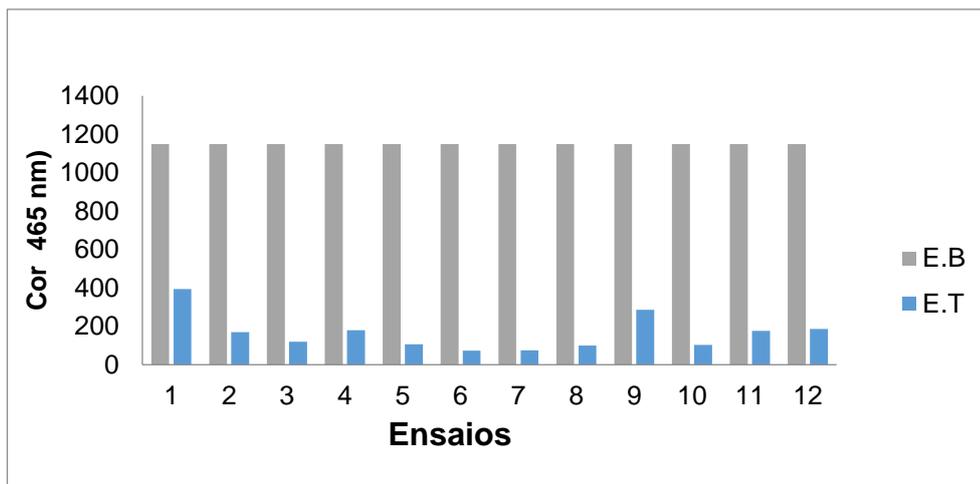


Gráfico 7 - Representação de remoção da Cor do efluente tratado em relação ao efluente bruto

A seguir no Gráfico 8, observa-se a eficiência do processo eletrolítico nos ensaios, onde a maior foi 93,6% no ensaio 6, e a menor 65,7% no ensaio 1.

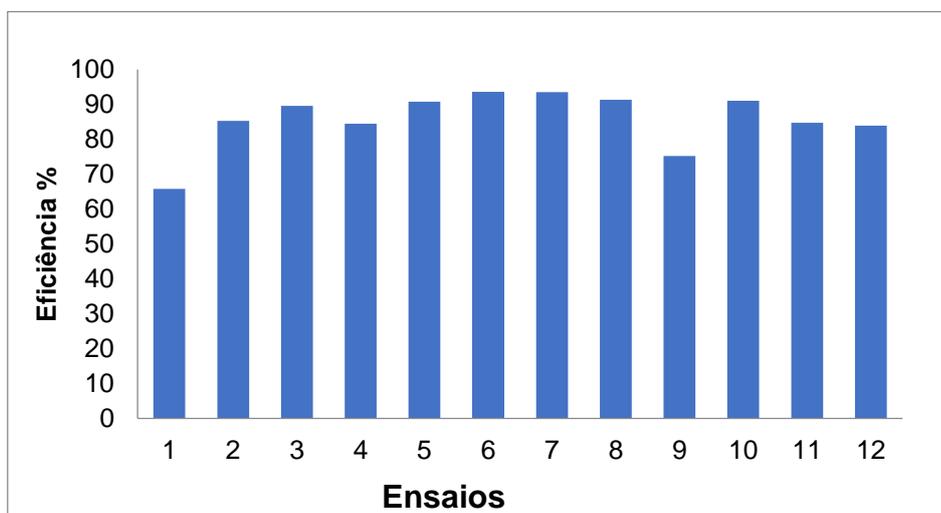


Gráfico 8 - Representação gráfica de remoção da Cor

Na Tabela 14, pode-se verificar a análise de variância dos dados remoção de Cor.

Tabela 14 - ANOVA da Cor

Fatores	G.L.	SQ	QM	F _{calc}	p-valor
x ₁ (L)	1	160,12	160,12	7,32	0,035
x ₁ (Q)	1	122,50	122,50	5,60	0,026
x ₂ (L)	1	150,48	150,48	6,88	0,039
x ₂ (Q)	1	213,57	213,57	9,77	0,020
x ₁ x ₂	1	142,17	142,17	6,50	0,043
Resíduos	6	131,19	21,86		

Observa-se na ANOVA que todos os termos, lineares e quadráticos, e a interação entre o diferencial de potencial e o tempo de retenção hidráulico foram significativos, com 95% de confiança.

O gráfico de Pareto, representado abaixo pelo GRÁFICO 9, corrobora com as informações da Tabela 14.

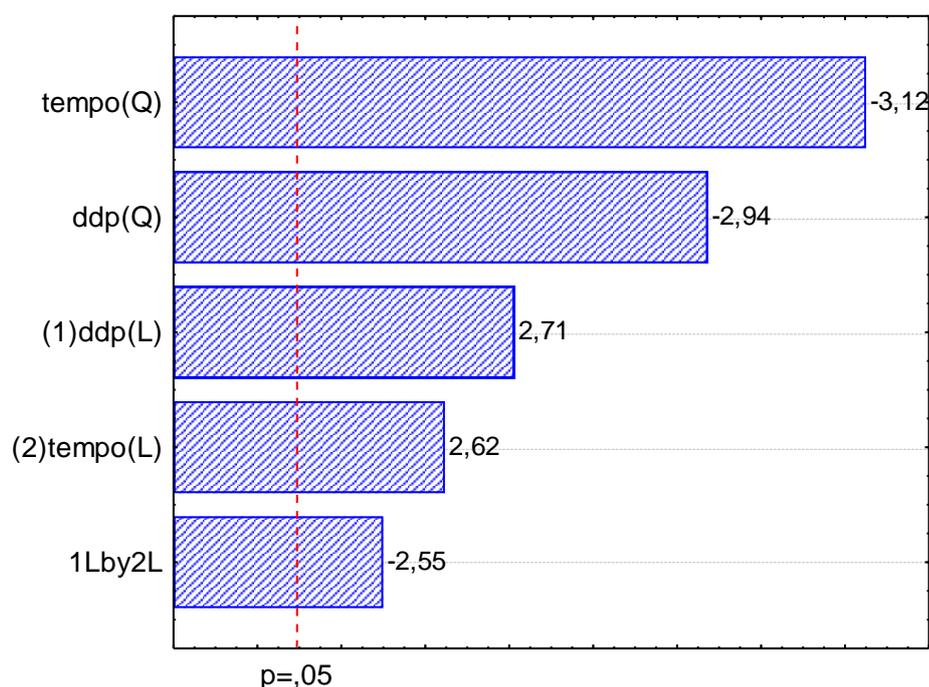


Gráfico 9 – Gráfico de Pareto da Cor

A Tabela 15 a seguir, é apresentado ANOVA para o modelo da remoção da Cor.

Tabela 15: ANOVA para modelo de remoção da cor

Fonte de Variação	S.Q.	GL	QM	F _{calc}	F _{tab}	p-valor
Regressão	788,84	5	157,77	7,21	4,39	0,016
Resíduos	131,19	6	21,86			
Total		11				

Observando a Tabela 15, verifica-se que o F_{calc} para a regressão é altamente significativo ($7,21 > 4,387$). Dessa maneira, pode-se concluir que o modelo se ajusta bem aos dados experimentais.

A seguir na Tabela 16, é apresentado os coeficientes do modelo de regressão.

Tabela 16 – Coeficientes de regressão para remoção da Cor

Fatores	Coeficientes de regressão
Média	91,76
x_1 (L)	4,48
x_1 (Q)	-5,45
x_2 (L)	4,34
x_2 (Q)	-5,80
$x_1 x_2$	-5,96

Através dos coeficientes, observa-se o modelo ajustado, também dito modelo completo ajustado pela equação 2.

$$\text{Remoção de Cor (\%)} = 91,76 + 4,48x_1 - 5,45x_1^2 + 4,34x_2 - 5,80x_2^2 - 5,96x_1x_2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Como todos os parâmetros apresentaram alta influência sobre o resultado do ajuste final, nenhum coeficiente foi retirado da equação.

Com posse do modelo válido, gerou-se a superfície de resposta, ilustrado nas Figuras 5 e 6.

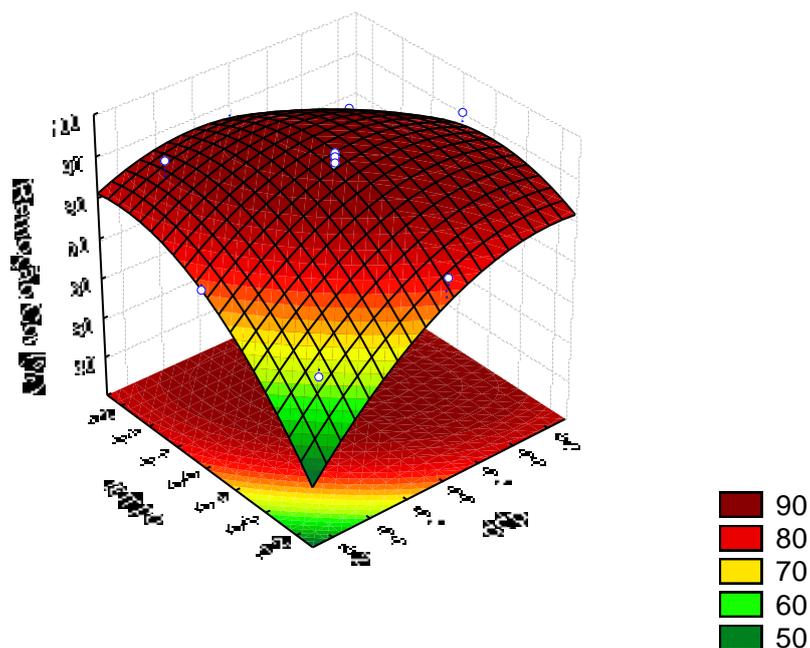


Figura 5 - Superfície de resposta (3D) para remoção da Cor.

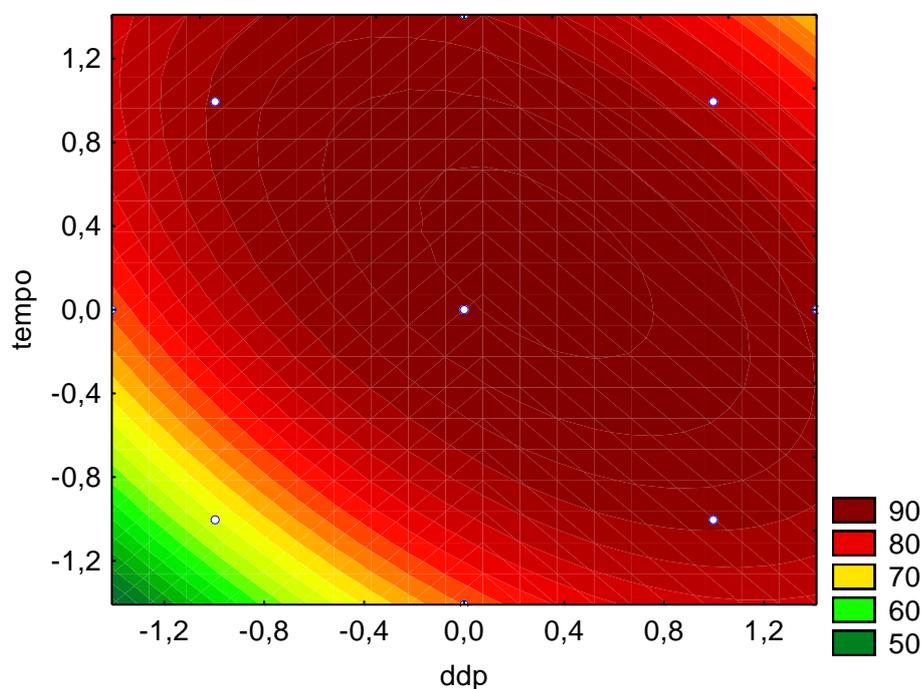


Figura 6 - Superfície de resposta para remoção da Cor.

Ao analisar a superfície de resposta, ilustrado nas Figuras 5 e 6, observa-se que as melhores condições para a remoção da Cor estão próximas ao ponto central.

4.4 EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO DE TURBIDEZ

Na Tabela 17 e Gráfico 10, pode-se observar os resultados obtidos na remoção da Turbidez do efluente, tratado pelo processo eletrolítico. A média é referente ao ensaio em duplicata.

Tabela 17 - Eficiência na remoção de turbidez

Ensaio	Média Turbidez Efluente Tratado (UNT)	Turbidez Efluente Bruto (UNT)	Eficiência na remoção de Turbidez (%)
1	74,0	150	50,6
2	42,5	150	71,6
3	34,8	150	76,8
4	47,3	150	68,5
5	31,6	150	78,9
6	25,4	150	83,1
7	27,3	150	81,8
8	26,6	150	82,3
9	53,5	150	64,3
10	28,7	150	80,8
11	52,4	150	65,1
12	43,5	150	71,0

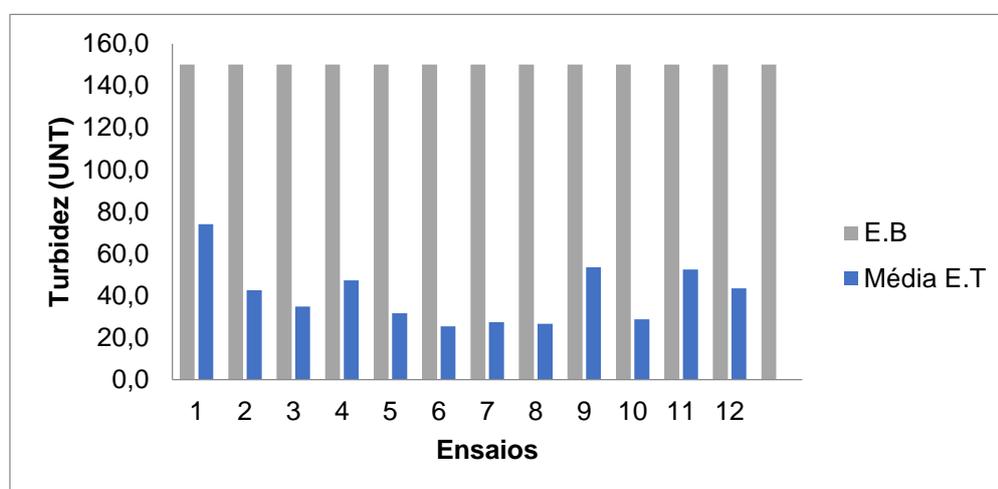


Gráfico 10 - Representação de remoção de Turbidez do efluente tratado em relação ao efluente bruto

A seguir no Gráfico 11, observa-se a eficiência do processo eletrolítico, onde a maior foi 83,1% no ensaio 6, e a menor 50,6% no ensaio 1.

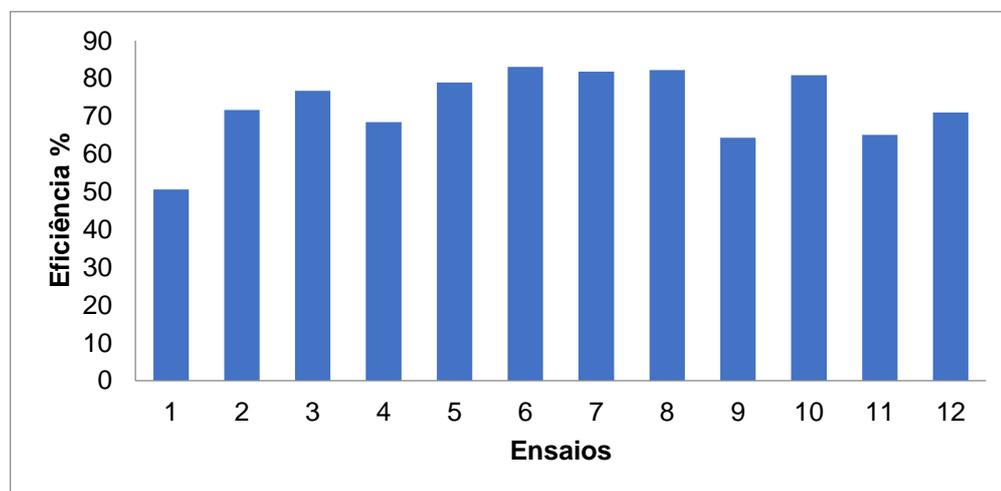


Gráfico 11 - Representação gráfica do percentual de eficiência na remoção de Turbidez

Na Tabela 18, pode-se verificar a análise de variância dos dados remoção de Turbidez.

Tabela 18 - ANOVA da Turbidez

Fatores	G.L.	SQ	QM	F _{calc}	p-valor
x ₁ (L)	1	46,68	46,68	2,77	0,147
x ₁ (Q)	1	168,91	168,91	10,04	0,019
x ₂ (L)	1	138,14	138,14	8,21	0,029
x ₂ (Q)	1	532,73	532,73	31,66	0,001
x ₁ x ₂	1	257,10	257,10	15,28	0,007
Resíduos	6	100,96	16,83		

Observa-se na ANOVA que o termo linear da ddp não foi significativo com 5% de significância. Já os demais termos foram significativos com 95% de confiança.

O gráfico de Pareto, representado a seguir pelo Gráfico 12, corrobora com as informações da Tabela 18.

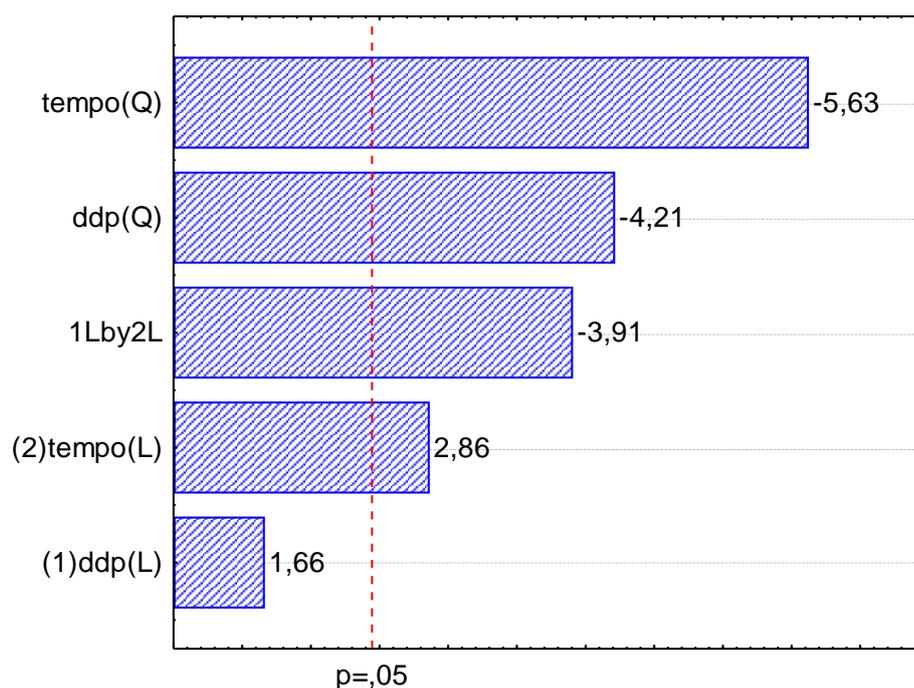


Gráfico 12 – Gráfico de Pareto da Turbidez

A Tabela 19 a seguir, é apresentado ANOVA para o modelo de remoção de Turbidez.

Tabela 19 - ANOVA para o modelo de remoção de turbidez.

Fonte de Variação	S.Q.	GL	QM	F _{calc}	F _{tab}	p-valor
Regressão	1143,57	5	228,71	13,59	4,387	0,0032
Resíduos	100,956	6	16,83			
Total		11				

Observando a Tabela 19, verifica-se que o F_{calc} para a regressão é altamente significativo ($13,59 > 4,387$). Dessa maneira, pode-se concluir que o modelo se ajusta bem aos dados experimentais.

A seguir na Tabela 20, é apresentado os coeficientes do modelo de regressão.

Tabela 20 - Coeficientes de regressão para a remoção de turbidez

Fatores	Coeficientes de regressão
Média	79,53
x_1 (L)	2,42
x_1 (Q)	-6,86
x_2 (L)	4,16
x_2 (Q)	-9,16
$x_1 x_2$	-8,02

Através dos coeficientes, observa-se o modelo ajustado, também dito modelo completo ajustado pela equação 3.

$$\text{Remoção de turbidez (\%)} = 79,53 - 6,86x_1^2 + 4,16x_2 - 9,16x_2^2 - 8,02x_1x_2 \quad (\text{Eq. 3})$$

Como o parâmetro linear da ddp não apresentou alta influência sobre o resultado do ajuste final, o coeficiente correspondente a esse termo foi retirado da equação.

Com posse do modelo válido, gerou-se a superfície de resposta, ilustrado nas Figuras 7 e 8.

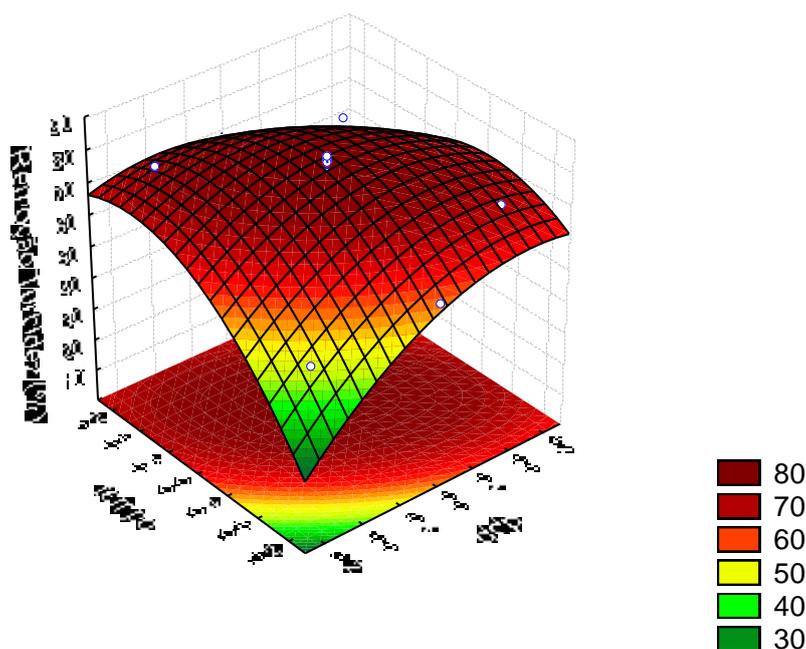


Figura 7: Superfície de reposta (3D) para remoção de Turbidez

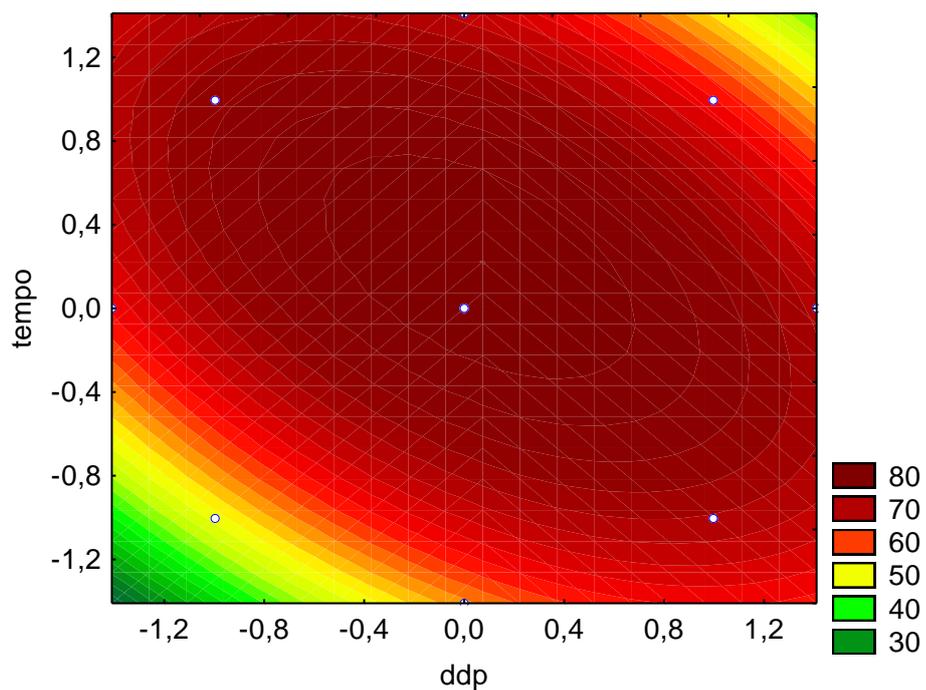


Figura 8: Superfície de resposta para remoção de turbidez

Ao analisar as superfícies de resposta, ilustrado nas Figuras 7 e 8, observa-se que as melhores condições para a remoção de Turbidez estão próximas ao ponto central.

5 CONCLUSÃO

O processo eletrolítico se mostrou eficiente para este tipo de efluente, obtendo valores significativos de remoção nos parâmetros analisados.

Após análises no efluente bruto e tratado pelo processo eletrolítico, foi constatado a eficiência do processo, com 87,5% de redução para DQO no ensaio 2, 93,6% de eficiência no ensaio 6 para o parâmetro Cor e 83,1% de eficiência no ensaio 6 para parâmetro Turbidez. Para o Fósforo, como mostrou os dados da ANOVA, o modelo não foi válido, pelo provável erro de análise no ensaio 9. Mas observando os resultados obtidos das análises nos outros ensaios, percebe-se que houve uma redução na concentração de Fósforo do efluente tratado em relação ao efluente bruto, com eficiência de 98,6%, nos ensaios 2, 6 e 10.

Ao termino do estudo, chegou-se à conclusão que as melhores condições se encontram no ponto central, onde a ddp estabelecida foi 20 volts e o tempo de retenção hidráulica 20 minutos.

O alumínio, material dos eletródos utilizado no estudo, é apontado como um dos fatores responsável pela síndrome do Alzheimer e a doença de Parkinson. Caso o efluente seja utilizado para fins que entrem em contato com a vida humana, merece ser estudo para trabalhos futuros, onde necessitaria de análises para verificar a concentração do Al no efluente tratado.

REFERÊNCIAS

BRITO, Georgya. A. **Sustentabilidade: um desafio para as lavanderias industriais.** REDIGE v. 4, n. 02, ago. 2013.

CERQUEIRA, Alexandre. A. **Aplicação da Técnica de Eletrofloculação no Tratamento de Efluentes Têxteis.** 2006. Dissertação de Mestrado, Universidade do estado do Rio de Janeiro.

CRESPILHO, Nelson. F; REZENDE, Maria. O. **Eletroflotação: Princípios e aplicações,** 2004.

COSTA. Andrea Fernanda. **Aplicação de tratamentos biológicos e físico-químico em efluentes de lavanderia e tinturaria industriais do município de Toritama no estado de Pernambuco.**

FABRIS, Caroline B.; MARMENTINI, Vilmar Jr. **Avaliação da Concentração Residual de Ferro em Efluente Têxtil Tratado por Eletrofloculação.** 2013. 39. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2013.

FLECK, Leandro; TAVARES, Maria; EYNG, Eduardo. **Utilização da técnica de eletrofloculação para tratamento de efluentes têxteis: uma revisão.** Revista EIXO, Brasília, DF, v. 2, n. 2, p. 51-65, jul./dez. 2013.

FORNARI, M. M. T. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes de curtume.** 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Toledo, 2007.

GOBBI, L. C. A. **Tratamento de água oleosa por eletrofloculação.** 2013.120 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Centro Universitário do Norte do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo. São Mateus, 2013.

MENEZES, Jean. C. S dos S. **Tratamento e reciclagem do efluente de uma lavanderia industrial.** Dissertação de Mestrado como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia – Área de Concentração Tecnologia Mineral / Metalúrgica Extrativa. Porto Alegre, RS. 2005.

MULLER, Aline Raquel; HOFFMANN, Ionara Fernanda; CARVALHO, Janaina Ferreira. **Avaliação dos efeitos das variáveis pertinentes a técnica de eletrofloculação aplicada ao efluente líquido de uma indústria têxtil.** 2010. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental, Medianeira, 2010.

OS PRODUTOS DE LIMPEZA E OS IMPACTOS AMBIENTAIS. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/_arquivos/prod_limpeza.pdf.> Acesso em: 20 de agosto de 2014.

QUEIROZ, Caroline Bressan. **Otimização da Técnica de Eletrofloculação Via Análise de Superfície de Resposta Aplicada ao Efluente de Uma Indústria Têxtil.** 2011 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2011.

SILVA, Paulo César França; MAINIER, Fernando. **Tratamento eletrolítico de resíduos líquidos gerados em indústrias mecânica fabricante de equipamentos para produção de petróleo.** p. 949-957.

STANDARD methods for the examination of water and wastewater. 22nd ed. Washington: APHA; AWWA; WEF, 2012.