

Artigo

Definição do Tempo de Retenção Hidráulico (TRH) e da Eficiência no Tratamento da Água Residuária do Café por um Sistema Eletrolítico

Gardiman Junior, B. S.;* Garcia, G. O.; Reis, E. F.

Rev. Virtual Quim., 2019, 11 (1), 82-103. Data de publicação na Web: 6 de março de 2019

<http://rvq.sbq.org.br>

Definition of Time of Detentions Hydraulic (TRH) and the Efficiency in the Treatment of Coffee Residue Water by an Electrolytic System

Abstract: The Coffee Wastewater (CW) from the wet processing of grains can cause serious impacts if it is released into the environment without treatment. Therefore, a very promising technique in the treatment of this effluent is the electrolytic. Thence, the objective of this study was to determine the ideal of Hydraulic Retentions of Time (HRT) based on the efficiency of removal of turbidity, total solids and Chemical Oxygen Demand (COD) and pH and electrical conductivity behavior. It was used an electrolytic cell with internal dimensions 8.15 wide, 13.8 cm long and 8.9 cm deep, having a volume of 1000 cm³. Batch tests were performed by varying the plate distance, current density and collection intervals of the reactor effluent from 60 to 1440 seconds for wastewater with and without reuse. Finally, it was found that 4.12 to 29.78 minutes is sufficient to treat the wastewater without recirculation and from 20.62 to 161.80 minutes for water with reuse in the grain processing unit. The turbidity of removal efficiency is influenced by hydroxide generation in the reactor itself and total solids and COD at high concentrations of other organic compounds.

Keywords: Coffee Wastewater; environmental contamination; electroflotation.

Resumo

A Água Residuária do Café (ARC) oriunda do beneficiamento via úmido dos grãos pode causar sérios impactos se lançada no meio ambiente sem tratamento. Assim, uma técnica bastante promissora no tratamento desse efluente é a eletrolítico. Por esse motivo, objetivou-se nesse estudo determinar o Tempo de Retenção Hidráulico (TRH) ideal com base na eficiência de remoção da turbidez, sólidos totais e Demanda Química de Oxigênio (DQO) e no comportamento do pH e da condutividade elétrica. Utilizou-se uma célula eletrolítica com as dimensões internas de 8,15 cm de largura, 13,8 cm de comprimento e 8,9 cm de profundidade, possuindo um volume de 1000 cm³. Realizaram-se ensaios em batelada variando a distância de placas, densidade de corrente e intervalos de coleta do efluente do reator entre 60 a 1440 segundos para a água residuária com e sem reúso. Por fim, constatou-se que 4,12 a 29,78 minutos é suficiente pra tratar a água residuária sem recirculação e de 20,62 a 161,80 minutos para água com reúso na unidade de processamento dos grãos. A eficiência de remoção da turbidez é influenciada pela geração de hidróxidos no próprio reator e de sólidos totais e DQO às grandes concentrações de outros compostos orgânicos.

Palavras-chave: Água Residuária do Café; contaminação ambiental; eletroflotação.

* Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Coordenadoria de Meio Ambiente, *Campus* Ibatiba, CEP 29056-255, Vitória-ES, Brasil.

✉ benvindo.gardiman@ifes.edu.br

DOI: [10.21577/1984-6835.20190007](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20190007)

Definição do Tempo de Retenção Hidráulico (TRH) e da Eficiência no Tratamento da Água Residuária do Café por um Sistema Eletrolítico

Benvindo S. Gardiman Junior,^{a,*} Giovanni de O. Garcia,^b Edvaldo F. dos Reis^b

^a Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Coordenadoria de Meio Ambiente, Campus Ibatiba, CEP 29056-255, Vitória-ES, Brasil.

^b Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Rural, CEP 29500-000, Alegre-ES, Brasil.

* benvindo.gardiman@ifes.edu.br

Recebido em 4 de abril de 2018. Aceito para publicação em 16 de dezembro de 2019

1. Introdução
2. Metodologia
3. Resultados e Discussão
4. Conclusão

1. Introdução

Após a colheita, os frutos do café podem ser processados de duas formas: via seca ou via úmida. No beneficiamento por via úmida, geralmente utiliza-se água para facilitar o processo de descascamento e despolpa,¹ principalmente para retirar a mucilagem, reduzindo a probabilidade de fermentação do grão e o tempo de secagem do mesmo,² conferindo-o maior valor agregado.

O efluente gerado no processo, denominado Água Residuária do Café (ARC) apresenta alto teor de matéria orgânica, expressa em Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_{5,20 °C}) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), é rica também em açúcares, proteínas, amido, pectina, compostos

fenólicos, nitrogênio total, fósforo total, sódio e,³ principalmente, potássio que, se lançada sem tratamento em corpos hídricos, pode causar diversos impactos ambientais.^{4,5}

Dentro desse contexto, pesquisadores propõem diversos sistemas de tratamento da ARC, como a decantação para remoção sólidos e posterior recirculação,⁶ sistemas biológicos visando remover matéria orgânica,^{7,8} químicos como a utilização de processos oxidativos avançados (POA's) para remoção de matéria orgânica.⁹ Contudo, alguns métodos podem apresentar, muitas vezes, desvantagens como elevado tempo de retenção, baixa eficiência, consumo de produtos químicos, difícil implantação e manutenção e grande área necessária. Assim, um processo bastante eficiente no tratamento de efluentes é o

eletrolítico, englobando a eletrocoagulação, eletrofloculação e eletroflotação.¹⁰

O processo eletrolítico basicamente envolve processos de reação de dissolução de cátions do metal usado no ânodo com simultâneas formação de hidróxidos e gás de hidrogênio no cátodo.¹¹ Durante o processo, as reações eletrolíticas na superfície do ânodo (+) conduz a geração de Al^{3+} por oxidação, no caso do alumínio, e íons H^+ e OH^- no cátodo (-),¹² que finalmente se transformam em $Al(OH)_3$ de acordo com a cinética de precipitação complexa.¹³

A técnica de eletrofloculação apresenta vantagens quando comparada aos métodos convencionais de tratamento de efluentes, tais como: alta eficiência na remoção de sólidos, sistema compacto, custos relativamente baixos e possibilidade de automação.¹³ Cita-se também, a utilização de equipamentos simples, fácil operação, menor tempo de retenção hidráulica (TRH), redução ou ausência de produtos químicos e microrganismos adicionados, rápida sedimentação dos flocos eletroquimicamente produzidos e uma menor produção de lodo.^{11,14-16} Entretanto, longos TRH's proporcionam um aumento progressivo do pH, independente da condição e,¹⁵ consequentemente da turbidez, ocasionados pelo geração de hidróxidos de alumínio.¹⁷

Assim, objetivou-se nesse estudo determinar o Tempo de Retenção Hidráulico (TRH) ideal e a eficiência do sistema eletrolítico refletido nas variáveis turbidez, sólidos totais, DQO e o comportamento do pH e condutividade elétrica para tratamento de água residuária do café com e sem recirculação.

2. Metodologia

O experimento foi implantado e conduzido no Laboratório de Pesquisa do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (Ifes), *Campus* Ibatiba. Coletaram-se amostras do efluente sem recirculação (ARC1) e com cerca de 8 recirculações (ARC2) oriunda

do despulpamento e desmucilagem dos grãos de café da espécie Arábica de uma unidade de processamento.

A Tabela 1 descreve as variáveis analisadas no efluente, o equipamento utilizado para detecção seguido do método, as formas de preservação, o prazo para análise, o volume mínimo e o tipo de frasco, conforme os procedimentos sugeridos na NBR 9898.¹⁸

Todos os reagentes utilizados nas análises possuíam padrão analítico de pureza. As curvas analíticas usadas na determinação apresentaram ajuste mínimo de 99,00 %. Os equipamentos (pHmetro e turbidímetro) devidamente calibrados com os respectivos padrões antes das análises. Todas as análises foram realizadas em triplicatas.

Visando otimizar recursos, no monitoramento do sistema, utilizaram-se as variáveis mais representativas dos principais poluentes existentes no efluente, tais como turbidez, representados os sólidos suspensos; os sólidos totais, a série de sólidos presentes; a DQO, o consumo de oxigênio para degradação da matéria total e açúcares; o pH para variação dos íons H^+ e OH^- gerados e condutividade elétrica para os sais e íons presentes.²²

Nos ensaios de eletrofloculação utilizou-se uma célula construída em vidro transparente com dois milímetros de espessura, com as seguintes dimensões internas: largura de 8,15 cm, comprimento de 13,8 cm e profundidade de 8,9 cm, possuindo um volume de 1000 cm^3 , dimensionada conforme as sugestões de Mollah *et al.*²³. A Célula possui entrada do efluente a 4,0 cm e saída a 2,0 cm do fundo, favorecendo a remoção de sólidos pela flotação (Figura 1).

Tabela 1. Variáveis analisadas e método utilizado para detecção, forma de preservação, prazo para análise, volume mínimo a ser coletado e frascos a serem utilizados em amostras para análises físico-químicas e microbiológicas segundo a NBR 9898¹⁸

Parâmetros	Equipamentos e métodos	Preservação	Prazo para análise	Volume Mínimo	Tipo frasco
Açúcares totais	Espectrofotômetro ¹⁹	Refrigerar a 4 °C	24 horas	200 mL	P ^a , V ^b
Condutividade elétrica	Condutivímetro de eletrodo	Refrigerar a 4 °C	28 dias	500 mL	P ^a , V ^b
Cor	Espectrofotômetro ²⁰	Refrigerar a 4 °C	48 h	300 mL	P ^a , V ^b
DQO	Espectrômetro UV-Vis - Tubos de digestão ²⁰	H ₂ SO ₄ conc. até pH < 2 Refrigerar a 4 °C	7 dias	100 mL	P ^a , V ^b
Fenóis totais	Espectrômetro UV-Vis - Método de Folin Ciocalteau	H ₃ PO ₄ 1:0 até pH < 2 Refrigerar a 4 °C	24 h	1000 mL	V ^b
Fósforo total	Espectrômetro UV-Vis – Colorimétrico ²⁰	H ₂ SO ₄ conc. até pH < 2 Refrigerar a 4 °C	28 dias	200 mL	V ^b
Nitrogênio total Kjeldahl	Destilador de N – Titulação ²⁰	H ₂ SO ₄ conc. até pH < 2 Refrigerar a 4 °C	7 dias	1000 mL	P ^a , V ^b
pH	pHmetro ²⁰	Refrigerar a 4 °C	6 horas	200 mL	P ^a , V ^b
Potássio	Espectrômetro de absorbância em chama NBR 13810 ²¹	HNO ₃ conc. até pH < 2	180 dias	1000 mL	P ^a , V ^b
Sólidos Totais	Gravimétrico ²⁰	Refrigerar a 4 °C	7 dias	1000 mL	P ^a , V ^b
Turbidez	Turbidímetro ²⁰	Refrigerar e manter ao abrigo da luz	24 horas	200 mL	P ^a , V ^b

^a Polietileno ^b Vidro borossilicato

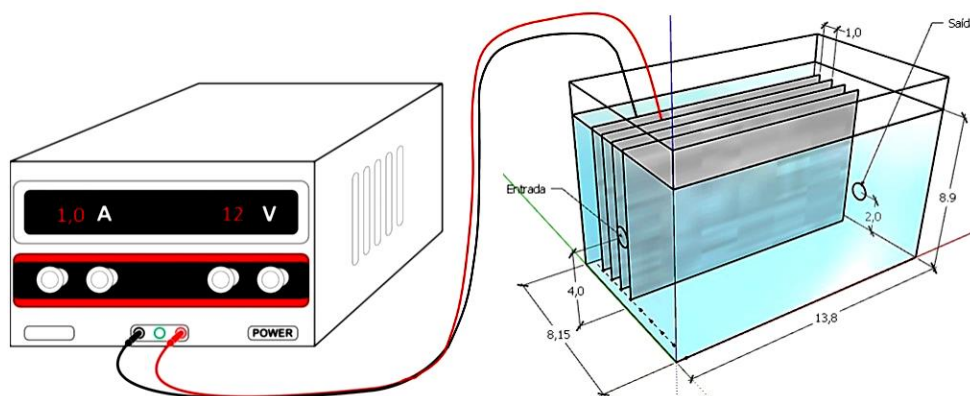


Figura 1. Desenho esquemático da célula eletrolítica utilizada nos ensaios. Fonte: O Autor

Os eletrodos foram confeccionados em chapa de alumínio ABNT/ASTM 1050 medindo 0,8 mm de espessura, 7,9 cm de largura por 13,0 cm de comprimento, com área superficial de 0,02054 m², ficando totalmente mergulhados no efluente a temperatura constante de 20 °C ±2. Utilizou-se uma configuração dos eletrodos bastante usual, conhecida como monopolar em paralelo, onde os eletrodos são polarizados intercaladamente através de ligações externas, sendo os ânodos os eletrodos de sacrifício.²³

Os ensaios em batelada foram realizados em duplicata combinando os fatores: Distância de Placas (DP) nos níveis de 10, 20 e 30 mm, Densidade de Corrente (DC) em 100, 75, 50 e 25 A m⁻² e os intervalos entre as coletas das amostras no reator variando entre 60 a 1440 segundos (Tabela 2). A variação entre os intervalos de coletas fez-se necessário uma vez que o aumento da corrente e a diminuição da distância entre

placas proporcionam um incremento de metal oxidado, melhorando a eficiência do processo e consequentemente diminuindo o tempo operacional.²⁴

Para a determinação do tempo de retenção (TRH) ideal, tomou-se como base a remoção máxima da turbidez, que pode ser influenciada pelos hidróxidos gerados no reator.²⁵ Os dados originais foram submetidos à análise de variância por meio do teste F, ao nível de 10 % e 5 % de confiança, para a ARC1 e ARC2, respectivamente, sendo os efeitos dos tratamentos sobre as médias das variáveis monitoradas estudados por meio da Análise de Regressão. Na escolha do melhor polinômio, verificou-se o teste F da análise de regressão e o R², separadamente de cada modelo, efetuando análises sequenciais. No máximo, foram incluídas (n-2) potências de cada variável, sendo o polinômio escolhido, aquele que apresentou mais significância, permanecendo modelos com menores graus.²⁶

Tabela 2. Distâncias de Placas (DP), Densidades de Corrente (DC) aplicadas e intervalos de coletas para cada um dos experimentos estudados

Ensaio	DP	DC	Intervalos de coleta(s)	
	mm	A m ⁻²	ARC1	ARC2
1	10	100	60	180
2	10	75	80	360
3	10	50	100	900
4	10	25	120	1200
5	20	100	60	480
6	20	75	60	600
7	20	50	60	960
8	20	25	120	1200
9	30	100	120	480
10	30	75	120	300
11	30	50	120	720
12	30	25	240	1440

3. Resultados e Discussão

Na Tabela 3 seguem apresentados os resultados da caracterização das águas residuárias do café (ARC1 e ARC2) utilizadas nos tratamentos. Destaca-se que os valores para a ARC1 estão próximos aos encontrados por Eustáquio *et al.*,²⁷ Matos *et al.*,²⁸ Selvamurugam *et al.*,²⁹ e Ulavi e Kumar³⁰ e ARC2 a Campos *et al.*,³ e Peralta *et al.*,³¹ quando estudaram o referido efluente.

O aspecto do efluente tratado se alterou no decorrer de tempo de cada ensaio. Observou-se que a remoção da turbidez se limita aos minutos iniciais e posteriormente tende à uma coloração esbranquiçada,

demonstrando uma incorporação de turbidez no sistema. A coloração evidenciada é, provavelmente, relacionada à maior concentração de hidróxidos formados, principalmente quando aplicado maiores níveis de tempo e densidade de corrente.^{3,32,33}

O observado no presente estudo também foi evidenciado por Valente³³ para efluente de laticínio quando tratado com eletrodos de zinco, principalmente aplicando maiores tempos de eletrólise e densidade de corrente. Combatt *et al.*,³² tratando efluente de abatedouro de aves com eletrodos de alumínio, também evidenciaram a formação de flocos esbranquiçados, pequenos e compactos que eram flotados durante o tratamento.

Tabela 3. Caracterização físico-química da água residuária do café sem recirculação (ARC1) e com recirculação (ARC2) utilizadas no estudo

Variável	Unidade	Valores Médios	
		ARC1	ARC2
Açúcares	mg L ⁻¹	6.950±36,5	17.984±469
CE	dS m ⁻¹	1,43±0,45	2,84±0,76
Cor	PCU	3.610±193	6.670±146
DQO	mg L ⁻¹	26.800±8.725	47.420±9.228
CF	mg L ⁻¹	212±8,1	542±58
K	mg L ⁻¹	471,44±55	1.354±105
N _{total}	mg L ⁻¹	12,2±0,8	40,1±1,2
OD	mg L ⁻¹	5,1±0,3	1,4±0,4
pH	----	4,7±0,4	4,43±0,2
P _{total}	mg L ⁻¹	16±1,2	20,1±2,0
ST	mg L ⁻¹	15.818±7.184	21.998±8.270
Turbidez	NTU	1.008±141	2.369±360

A súbita elevação da turbidez, ocasionando uma queda drástica na eficiência, aconteceu, sem exceção, em todos os ensaios (1 a 12) da ARC1 e ARC2, com distinção apenas no tempo. A explicação do fenômeno pode ser a liberação de Al³⁺ no ânodo e a variação no pH, que conduzem a formação de moléculas complexas, tais como, Al(OH)²⁺, Al(OH)₂⁺, Al₂(OH)₂⁴⁺, Al(OH)₄⁻, bem como espécies poliméricas como Al₆(OH)₁₅³⁺, Al₇(OH)₁₇⁴⁺, Al₈(OH)₂₀⁴⁺, Al₁₃O₄(OH)₂₄⁷⁺, Al₁₃(OH)₃₄⁵⁺, que finalmente se transformam em Al(OH)₃ de acordo com a cinética de precipitação complexa.¹³ A precipitação ocorre em intervalos específicos de pH, ao alterar a concentração das espécies formadas e sua relação proporcional.^{34,35} Essa alteração leva à insolubilidade da espécie Al(OH)₃ em valores de pH entre 5,0 e 6,0,³⁵ intervalos em que o efluente transita ao longo do tratamento, interferindo na turbidez na forma de sólidos suspensos.

Nesse estudo, o momento em que os TRH's apresentaram a elevação da turbidez, tornaram o limite de eficiência para análise dos demais parâmetros, tendo em vista que

tempos superiores a esses podem apresentar desvantagens, como: aumento do consumo de energia elétrica, incremento de turbidez, aquecimento do reator, passivação dos eletrodos e etc. A interrupção do tratamento após apresentar uma coloração esbranquiçada também foi realizado por Barbosa e Teran²⁵ em efluentes de da indústria de reciclagem de plástico, indicando ter cessado a remoção de sólidos por flotação.

Para o parâmetro pH, independentemente da condição avaliada, houve um aumento progressivo com incrementos de 0,11 a 0,77 e 0,14 a 1,30 unidades de pH, para a ARC1 e ARC2, respectivamente, até o momento que a turbidez atinge a eficiência máxima, aumentando progressivamente até o final dos tratamentos. O fato observado é comum no tratamento eletrolítico e já foi evidenciado por outros autores. Vu *et al.*,³⁵ atribuem o aumento do pH ao excesso de íons hidroxilas produzidos no cátodo, devido à ocorrência de uma troca parcial de íons Cl⁻, pelos OH⁻, na molécula de Al(OH)₃. Esse mesmo efeito detectado no pH também foi relatado por Kannan *et al.*,³⁶ e o comportamento foi

semelhante ao observado por outros autores.^{15,36-38}

Quanto aos Sólidos Totais (ST), maiores eficiências de remoção foram observadas em ensaios com menores Distâncias de Placas (DP) e maiores níveis de Densidade de Corrente (DC). O constatado pode estar relacionado à maior produção do agente coagulante ($Al(OH)_3$) e geração dos gases (principalmente o hidrogênio), que favorecem a floculação e posterior flotação dos sólidos, respectivamente.^{11,23,39,40} Por outro lado, menores eficiências de remoção dos sólidos, como observado em alguns ensaios, podem estar relacionados, provavelmente à incorporação do próprio material do eletrodo consumido na operação,⁴¹ bem como elevados teores de açúcares e sólidos dissolvidos presentes no efluente.⁴²

O comportamento verificado para ST é oposto ao da turbidez em muitos ensaios da ARC1 e coerente na ARC2, quando relacionado os fatores envolvidos no tratamento (TRH, DP e DC). É possível observar que uma combinação com elevadas DC's e baixas DP's favorecem a remoção por flotação de sólidos suspensos que são os percussores da turbidez,³⁹ corroborando com a relação para a ARC2 que possui mais essa fração de sólidos. Entretanto, como a maior parte (73 %) dos ST's da ARC são constituídos pelos dissolvidos¹ e a eletrofloculação apresenta baixa eficiência para remoção nessa fração de sólidos,²³ a remoção de ST's limitou-se a valores próximos a 30 % em ambos os efluentes, toeres correspondentes prováveis aos sólidos suspensos.

Constatou que durante o tratamento, com a atuação dos fatores TRH, DP e DC, os sólidos dissolvidos fixos do próprio efluente se aglutinam com os hidróxidos gerados no reator formando pequenos flocos, elevando os valores de turbidez. Coerente com essa afirmação estão Valente *et al.*,⁴¹ e Casillas *et al.*,⁴² que observaram, inclusive, um acréscimo de sólidos dissolvidos no efluente de laticínio tratado por esse meio.

A remoção de DQO na ARC1 se limitou entre 6,61 a 23,23 %, como constatado nos ensaios 5 e 9, respectivamente (Tabela 4). Na ARC2, valores entre 4,89 e 23,55 % nos ensaios 4 e 11, respetivamente (Tabela 5). A alta concentração de sólidos, principalmente os dissolvidos, podem ter favorecido nessa observação. Os compostos que constituem essa fração são, por exemplo, sacarose, lactose, não são removidos pelo tratamento eletrolítico.^{23,41,42} Em tempo, relata-se que o mecanismo de remoção da DQO por tratamento eletrolítico ainda não é totalmente conhecido, carecendo de mais pesquisas.

Por fim, nota-se que a Condutividade Elétrica (CE) não apresentou padrão de alteração. Entretanto, destaca-se que ensaios com maiores DC's aplicadas, como por exemplo 1, 5 e 6 da ARC1 (Tabela 4) e 1, 2, 3, 4 e 6 da ARC2 (Tabela 5), favoreceram o aumento de íons do metal oxidado na solução, contribuindo, conseqüentemente, para o aumento da condutividade no meio.^{43,44} Logo, a massa de metais dissolvidos formada durante a eletrólise a uma corrente constante obedece a Lei de Faraday.³⁹

Por meio da Tabela 4 e 5 notam-se que maiores Densidades de Corrente (DC) e menores Distâncias entre Placas (DP) proporcionaram tratamentos com menores Tempos de Retenção Hidráulico (TRH). O aumento da corrente proporciona um aumento da quantidade de metal oxidado (Al^{3+}), gerando uma maior quantidade de flocos de hidróxido de alumínio que serão flotados, conduzindo uma redução no tempo operacional do tratamento.^{24,35} Uma diminuição do tempo também foi observada por Chen *et al.*,⁴⁵ no tratamento eletroquímico de uma emulsão óleo-água, quando a densidade de corrente foi aumentada.

Coerente com o apresentado, ensaios com menores DC ($25 A m^{-2}$) e maiores DP (20 e 30) foram os que apresentaram maiores TRH's, como por exemplo os ensaios 8 e 12 de ambas as ARC's estudadas. Todavia, registra-se eficiências na remoção de turbidez acima de 78 % nesses experimentos, o que denota que

não apenas deve-se proporcionar apenas a formação de hidróxidos de alumínio $\text{Al}(\text{OH})_3$ que atuam como coagulante, como também o tempo necessário para ocorrer a floculação e flotação da matéria presente.³⁷ Assim, deve-se haver um equilíbrio entre a geração de gases, formação de coagulante e tempo para decantação/flotação do material presente.

A turbidez foi a variável que apresentou melhor eficiência de remoção, valores entre 55,92 e 89,34 % e 78,53 % e 93,19 %, para as ARC's 1 e 2, respectivamente. Na ARC1 verifica-se menores eficiências de remoção da turbidez em DC mais elevadas, dentre os experimentos de mesma DP, contradizendo a relação encontrada por alguns autores.^{37,38} Isso permite deduzir, que para efluentes com menores taxas de sólidos suspensos, a maior geração de hidróxidos em altas correntes conduzem à formação de pequenos coágulos que podem ter contribuído para aumentar a quantidade de material coloidal e em suspensão no meio,⁴⁶ interferindo na transparência da amostra, já explicado anteriormente.

Ainda por meio das Tabelas 4 e 5 denotam-se também, como já elucidado, que maiores níveis de DC aplicadas e menores DE contribuem para maiores eficiências na remoção de sólidos, devido a maior formação de gases que facilitam a remoção de sólidos por flotação.⁴⁷

Quanto às baixas eficiências de remoção da DQO, principalmente relacionadas às altas DC, em pequenas DP e curtos TRH's também foi observado por Tchamango et.al.,⁴⁸ e Chen et. al.,⁴⁵ estudando efluentes de laticínio e restaurante, respectivamente. Os autores atribuíram esse comportamento, em relação a DQO, à presença de compostos orgânicos

dissolvidos, os quais são de difícil remoção por processos que empregam a coagulação como forma de separação. A afirmativa supracitada pode ser aceita para a ARC que evidencia altas concentrações (cerca de 2.000 mg L⁻¹) desses compostos.³ Salienta-se, ademais, que o mecanismo de remoção da DQO por eletrofloculação não é totalmente compreendido, havendo poucas pesquisas e fatores que evidenciam as espécies iônicas e compostos nas águas residuárias.⁴²

Ao se analisar os dados em função do TRH's, através da Tabela 4 e 5 constatam-se que os menores encontrados, se comparando as mesmas DP's, quando aplicado maiores níveis de DC. As elevadas correntes propiciam superior geração de hidróxidos que agirão na floculação e na geração de gases,³⁹ reduzindo o tempo de tratamento.

Da mesma forma, destaca-se que TRH's semelhantes ou próximos em DC's de 100, 75 e 50 A m⁻², levam a deduzir que as densidades de correntes aplicadas sejam suficiente para o tratamento, considerando a condutividade do efluente e as distâncias de placas. Sengil e Ozacar,⁴⁹ tratando efluente de laticínio na Turquia com condutividade elétrica de 1,2 $\mu\text{S cm}^{-1}$ e pH entre 3,5 a 10, obtiveram melhores resultados de remoção com densidades de correntes de 3 a 18 A m⁻², corroborando com o explicitado acima.

A eficiência do processo de EC está relacionada ao controle de vários parâmetros, como por exemplo: a densidade da corrente contínua e a tensão na célula, a taxa de agitação ou vazão, o pH, a concentração de eletrólitos, a área específica dos eletrodos, o tempo de permanência na célula, o tamanho das partículas e as concentrações dos poluentes.^{35,38,44}

Tabela 4. Eficiência de remoção (em %) da Turbidez, Sólidos Totais (ST) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) e variação absoluta da Condutividade Elétrica (CE) e pH em cada um dos ensaios nos Tempos de Retenção Hidráulico (TRH) estabelecidos para a Água Residuária do Café sem recirculação (ARC1)

Ensaio	DP mm	DC A m ⁻²	TRH min	Turbidez	ST	DQO	CE	pH
				Eficiência de remoção %			Variação média	
1	10	100	4,12	55,92	28,40	6,75	-0,24	0,71
2	10	75	6,87	63,62	15,23	7,63	0,02	0,77
3	10	50	7,00	72,20	11,96	13,05	0,10	0,77
4	10	25	7,44	62,12	10,00	8,27	0,13	0,54
5	20	100	4,12	76,53	14,02	6,61	-0,11	0,78
6	20	75	4,12	80,50	12,62	9,16	-0,16	0,11
7	20	50	4,12	65,00	14,67	12,59	0,05	0,16
8	20	25	12,62	87,08	5,67	18,13	0,01	0,34
9	30	100	8,24	83,00	8,83	23,23	0,02	0,45
10	30	75	8,24	83,78	6,97	16,78	0,08	0,43
11	30	50	10,41	83,24	2,97	25,98	-0,01	0,24
12	30	25	29,78	89,34	5,89	10,20	0,08	0,19

Tabela 5. Eficiência de remoção (em %) da Turbidez, Sólidos Totais (ST) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) e variação absoluta da Condutividade Elétrica (CE) e pH em cada um dos ensaios nos Tempos de Retenção Hidráulico (TRH) estabelecidos para a Água Residuária do Café com recirculação (ARC2)

Ensaio	DP mm	DC A m ⁻²	TRH min	Turbidez	ST	DQO	CE	pH
				Eficiência de remoção %			Variação	
1	10	100	22,34	91,10	30,09	16,08	-0,38	0,85
2	10	75	54,10	87,57	30,68	18,10	-0,21	1,30
3	10	50	101,12	86,27	29,86	23,54	-1,00	1,20
4	10	25	160,92	88,14	27,40	23,55	-0,56	1,15
5	20	100	50,53	90,85	20,90	8,33	0,35	1,08
6	20	75	54,95	89,06	31,35	9,89	-0,14	1,07
7	20	50	50,53	83,21	14,42	16,46	0,27	0,58
8	20	25	109,89	88,93	18,85	17,50	0,19	0,76
9	30	100	34,41	89,48	17,36	13,81	0,82	1,23
10	30	75	20,62	93,19	10,81	9,57	0,31	0,72
11	30	50	37,89	91,93	14,82	4,89	0,28	0,61
12	30	25	161,80	78,53	8,29	11,14	0,30	0,14

Por outro lado, ao se comparar a remoção de DQO, Asha e Kumar,⁵⁰ utilizando eletrodos de alumínio, pH de 4,5 e DC's de 93,87 A m⁻², condições próximas a esse estudo, relatam que a redução de DQO nos primeiros 45 minutos é gradual. A máxima remoção (88 %) aconteceu passado 75 minutos. A tardia remoção se deve, segundo os autores, a eletro-oxidação indireta da matéria orgânica pelos íons cloreto gerados no reator. Logo, é importante destacar que os autores não avaliaram o comportamento da turbidez ao longo do tratamento. Diversas pesquisas revelam que a remoção da DQO e DBO por processos eletrolíticos ocorrem por oxidação

da matéria orgânica pelos cloretos e óxidos/hidróxidos gerados no reator em tempo de retenção mais elevados.⁴⁰

Um modelo cúbico foi o que mais se ajustou para a turbidez e um linear para o pH em todos os ensaios (Tabela 6) para a ARC1. Para a ARC2 (Tabela 7), a turbidez ajustou-se melhor ao modelo quadrático nos ensaios 7, 9, 11 e 12. O observado se deve ao comportamento da turbidez durante a remoção, incremento e solubilização dos fatores que interferem. Já o pH apresentou incrementos gradativos até o final do tratamento, justificando a relação linear.

Tabela 6. Coeficiente de Determinação (R^2), p_{valor} , valores da distribuição F de Fisher-Snedecor (F_{cal} , F_{tab} 10 %), coeficientes da regressão (β_0 , β_1 , β_2 e β_3) associados aos modelos ajustados para cada variável nos ensaios realizados para a Água Residuária do Café sem recirculação (ARC1)

Ensaio s	Variável	Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	F_{tab}	F_{cal}	p_{valor}	R^2
1	Turbidez	Cúbico	1090,4	195,7	-273,7	46,8	9,16	60,07	0,01 ^a	0,99
	pH	Linear	5,128	0,180	-	-	5,54	237,09	0,00 ^a	0,98
	CE	Cúbico	1,470	-0,243	0,080	-0,007	9,16	1,52	0,42	0,69
	ST	Cúbico	24258,7	-7382,9	2425,1	-240,9	9,16	11,05	0,08 ^a	0,94
	DQO	Cúbico	27686,2	-3440,7	1637,9	-211,7	9,16	3,81	0,21	0,85
2	Turbidez	Cúbico	1014,4	13,6	-82,8	10,1	5,39	13,56	0,03 ^a	0,93
	pH	Linear	4,824	0,122	-	-	4,06	101,61	0,00 ^a	0,95
	CE	Cúbico	1,364	-0,113	0,024	-0,001	5,39	3,66	0,16	0,79
	ST	Cúbico	20511,6	-1582,6	350,0	-24,7	5,39	7,27	0,07 ^a	0,88
	DQO	Cúbico	24647,3	-447,9	0,1	2,2	5,39	10,74	0,04 ^a	0,91
3	Turbidez	Cúbico	1076,6	71,6	-94,5	10,2	9,16	12,76	0,07 ^a	0,95
	pH	Linear	4,944	0,119	-	-	4,54	53,23	0,00 ^a	0,93
	CE	Quadrático	1,104	0,000	0,001	-	5,46	5,91	0,09 ^a	0,80
	ST	Quadrático	16239,9	-381,8	23,2	-	5,46	4,18	0,14	0,74
	DQO	Quadrático	27823,2	-633,6	7,3	-	5,46	36,95	0,01 ^a	0,96
4	Turbidez	Cúbico	815,5	54,4	-78,7	9,2	53,8	44,02	0,12	0,99
	pH	Linear	5,154	0,096	-	-	5,54	65,95	0,00 ^a	0,96
	CE	Cúbico	1,229	-0,003	0,012	-0,001	53,8	38,48	0,12	0,99
	ST	Cúbico	17046,8	-1011,0	199,1	-12,7	53,8	49,26	0,11	0,99

	DQO	Cúbico	24545,0	190,4	-177,0	14,0	53,8	16,20	0,19	0,98
5	Turbidez	Cúbico	1054,9	32,5	-229,5	43,5	9,16	25,25	0,04 ^a	0,97
	pH	Linear	4,850	0,127	-	-	4,54	11,36	0,03 ^a	0,74
	CE	Cúbico	1,684	-0,169	0,071	-0,009	9,16	7,81	0,12	0,92
	ST	Cúbico	19958,9	-3017,9	965,3	-94,6	9,16	11,06	0,08 ^a	0,94
	DQO	Cúbico	28595,3	-2164,0	838,5	-100,4	9,16	3,56	0,23	0,84
6	Turbidez	Cúbico	878,2	232,1	-305,0	51,5	9,16	25,47	0,04 ^a	0,97
	pH	Linear	4,423	0,047	-	-	4,54	21,46	0,01 ^a	0,84
	CE	Linear	1,609	-0,041	-	-	4,54	30,07	0,01 ^a	0,88
	ST	Cúbico	13530,4	-1789,4	584,7	-57,7	9,16	14,38	0,07 ^a	0,96
	DQO	Quadrático	21978,2	-646,5	19,3	-	5,46	365,33	0,00 ^a	1,00
7	Turbidez	Cúbico	869,8	222,1	-280,8	48,5	9,16	16,89	0,06 ^a	0,96
	pH	Linear	4,700	0,055	-	-	4,54	27,04	0,01 ^a	0,87
	CE	Linear	1,244	0,011	-	-	4,54	6,17	0,07 ^a	0,61
	ST	Cúbico	16050,9	-3432,8	1232,8	-126,1	9,16	9,47	0,098 ^a	0,93
	DQO	Quadrático	24335,1	-1310,2	122,3	-	5,46	26,97	0,01 ^a	0,95
8	Turbidez	Cúbico	951,5	-47,9	-20,7	1,7	4,10	9,87	0,03 ^a	0,88
	pH	Linear	4,466	0,029	-	-	3,77	119,14	0,00 ^a	0,95
	CE	Quadrático	1,361	0,009	-0,001	-	3,78	0,39	0,70	0,14
	ST	Cúbico	10298,8	-342,7	48,9	-2,0	4,19	5,57	0,07 ^a	0,81
	DQO	Cúbico	22748,4	-2070,0	289,8	-11,8	4,19	17,24	0,01 ^a	0,93
9	Turbidez	Cúbico	1016,1	-128,7	-27,9	4,0	9,16	11,18	0,08 ^a	0,94
	pH	Linear	4,770	0,066	-	-	4,54	66,85	0,00 ^a	0,94
	CE	Cúbico	1,274	-0,024	0,008	-0,001	9,16	2,48	0,30	0,79
	ST	Cúbico	10864,2	-527,2	91,9	-4,8	9,16	8,72	0,11	0,93
	DQO	Quadrático	32190,3	-2415,3	187,6	-	5,46	4,95	0,11	0,77
10	Turbidez	Cúbico	997,5	-85,0	-35,5	4,3	9,16	9,54	0,10 ^a	0,93
	pH	Linear	4,555	0,065	-	-	4,54	11,60	0,03 ^a	0,74
	CE	Cúbico	1,251	-0,030	0,010	-0,001	9,16	8,92	0,10	0,93
	ST	Cúbico	10180,8	-585,8	110,4	-5,8	9,16	12,80	0,07 ^a	0,95
	DQO	Linear	21269,2	-557,8	-	-	4,54	162,59	0,00 ^a	0,98
11	Turbidez	Cúbico	990,4	-35,5	-31,6	2,8	5,39	11,48	0,04 ^a	0,92
	pH	Linear	4,496	0,027	-	-	4,06	93,52	0,00 ^a	0,95

	CE	Linear	1,519	0,011	-	-	4,06	1,38	0,29	0,22
	ST	Cúbico	10447,2	-258,0	46,3	-2,2	5,39	2,58	0,23	0,72
	DQO	Cúbico	37507,5	-6934,9	921,7	-39,0	5,39	37,29	0,01 ^a	0,97
	Turbidez	Cúbico	931,3	-15,0	-3,9	0,1	3,62	6,92	0,03 ^a	0,81
	pH	Linear	4,344	0,011	-	-	3,58	43,51	0,00 ^a	0,86
12	CE	Cúbico	1,899	0,001	0,001	0,0	3,62	8,60	0,02 ^a	0,84
	ST	Cúbico	18824,6	-225,4	12,9	-0,2	3,62	3,08	0,13	0,65
	DQO	Cúbico	26958,4	-289,5	11,0	-0,2	3,62	329,57	0,00 ^a	1,00

^a significativo ao nível de 10 % pelo teste F

Tabela 7. Coeficiente de Determinação (R^2), p_{valor} , valores da distribuição F de Fisher-Snedecor (F_{cal} , F_{tab} 10 %), coeficientes da regressão (β_0 , β_1 , β_2 e β_3) associados aos modelos ajustados para cada variável nos ensaios realizados para a Água Residuária do Café com recirculação (ARC2)

Ensaio	Variável	Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	F_{tab}	F_{cal}	p_{valor}	R^2
1	Turbidez	Cúbico	2417,2	236,02	-33,85	0,8	5,41	19,31	0,00 ^b	0,92
	pH	Linear	4,27	0,04	-	-	3,58	1675,4	0,00 ^b	1,00
	CE	Cúbico	1,97	0,07	-0,01	0,0	5,41	4,09	0,08	0,71
	ST	Quadrático	18159,5	-397,88	9,03	-	5,14	32,38	0,00 ^b	0,92
	DQO	Quadrático	38404,6	-605,40	5,01	-	5,14	206,33	0,00 ^b	0,99
2	Turbidez	Cúbico	2209,8	136,10	-8,20	0,0	4,76	48,06	0,00 ^b	0,96
	pH	Linear	4,48	0,02	-	-	5,32	449,26	0,00 ^b	0,98
	CE	Cúbico	2,28	0,13	0,00	0,0	4,76	2,05	0,21	0,51
	ST	Quadrático	23270,9	-170,22	1,14	-	4,74	126,01	0,00 ^b	0,97
	DQO	Quadrático	53543,1	-505,70	5,44	-	4,74	10,65	0,00 ^b	0,75
3	Turbidez	Cúbico	2272,4	10,35	-1,06	0,0	6,59	22,63	0,00 ^b	0,94
	pH	Linear	4,46	0,01	-	-	5,99	116,64	0,00 ^b	0,95
	CE	Quadrático	2,67	0,02	0,00	-	5,79	5,36	0,06 ^b	0,68
	ST	Quadrático	23481,1	-162,91	0,92	-	5,79	81,69	0,00 ^b	0,97
	DQO	Quadrático	56263,9	-408,49	2,46	-	5,79	79,12	0,00 ^b	0,97
4	Turbidez	Cúbico	2086,1	-23,37	-0,02	0,0	5,4	8,84	0,02 ^b	0,84
	pH	Linear	4,42	0,01	-	-	5,59	5004,3	0,00 ^b	1,00
	CE	Quadrático	3,08	0,01	0,00	-	5,1	33,14	0,00 ^b	0,92
	ST	Cúbico	22029,9	-199,05	2,03	-0,0	5,4	19,45	0,00 ^b	0,92
	DQO	Cúbico	48196,3	-232,97	1,87	-0,0	5,4	19,48	0,00 ^b	0,92

5	Turbidez	Cúbico	2437,7	127,05	-7,88	0,0	6,59	23,55	0,00 ^b	0,95
	pH	Linear	4,49	0,02	-	-	5,99	103,86	0,00 ^b	0,95
	CE	Linear	2,97	0,01	-	-	5,99	17,26	0,00 ^b	0,74
	ST	Cuadrático	21449,8	-131,68	1,15	-	5,79	32,45	0,00 ^b	0,93
	DQO	Cúbico	50767,0	440,98	-29,93	0,3	6,59	37,78	0,00 ^b	0,97
6	Turbidez	Cúbico	2476,8	21,42	-3,64	0,0	9,28	41,01	0,00 ^b	0,98
	pH	Linear	4,43	0,02	-	-	6,61	60,45	0,00 ^b	0,92
	CE	Cuadrático	3,56	0,02	0,00	-	6,94	24,36	0,00 ^b	0,92
	ST	Cuadrático	20977,3	-293,55	3,38	-	6,94	18,91	0,01 ^b	0,90
	DQO	Linear	49178,1	-136,97	-	-	6,61	4,75	0,08	0,49
7	Turbidez	Cuadrático	2495,3	-81,19	0,90	-	19,00	13,33	0,07	0,93
	pH	Linear	4,46	0,01	-	-	10,13	565,9	0,00 ^b	0,99
	CE	Cuadrático	2,34	0,02	0,00	-	19,00	11,10	0,08	0,92
	ST	Cuadrático	16790,4	-138,62	1,65	-	19,00	10,89	0,08	0,92
	DQO	Cuadrático	46104,9	-289,26	1,29	-	19,00	109,68	0,00 ^b	0,99
8	Turbidez	Cúbico	2390,5	-23,21	-0,26	0,0	9,28	187,81	0,00 ^b	0,99
	pH	Linear	4,44	0,01	-	-	6,61	1080,5	0,00 ^b	1,00
	CE	Cuadrático	3,61	-0,01	0,00	-	6,94	0,11	0,90 ^b	0,05
	ST	Cúbico	19831,1	-178,08	2,40	-0,0	9,28	57,78	0,00 ^b	0,98
	DQO	Cúbico	46219,8	-390,37	4,86	-0,0	9,28	30,98	0,01 ^b	0,97
9	Turbidez	Cuadrático	2758,8	-162,00	2,67	-	9,55	12,53	0,03 ^b	0,89
	pH	Linear	4,59	0,03	-	-	7,71	62,06	0,00 ^b	0,94
	CE	Cuadrático	2,81	0,09	0,00	-	9,55	22,96	0,01 ^b	0,94
	ST	Cúbico	24083,3	-559,23	24,65	-0,3	19,16	2,71	0,28	0,80
	DQO	Cuadrático	51482,6	-515,96	7,71	-	9,55	16,10	0,02 ^b	0,91
10	Turbidez	Cúbico	2413,3	-64,08	-12,01	0,5	19,1	86,74	0,01 ^b	0,99
	pH	Linear	4,39	0,03	-	-	7,71	13850,1	0,00 ^b	1,00
	CE	Cuadrático	2,68	0,03	0,00	-	9,55	2,33	0,24	0,61
	ST	Cúbico	17714,8	-556,18	39,30	-0,8	19,61	20,28	0,04 ^b	0,97
	DQO	Cúbico	37690,4	-996,69	72,90	-1,5	19,61	8,48	0,10	0,93
11	Turbidez	Cuadrático	2582,1	-120,21	1,75	-	19,00	12,21	0,07	0,92
	pH	Linear	4,37	0,02	-	-	10,13	1295,1	0,00 ^b	1,00
	CE	Cuadrático	2,91	0,02	0,00	-	19,00	129,14	0,00 ^b	0,99
	ST	Cuadrático	18969,9	-178,11	2,60	-	19,00	22,05	0,04 ^b	0,96

	DQO	Linear	38213,0	-50,43	-	-	10,13	4,27	0,13	0,59
	Turbidez	Quadrático	1922,4	-25,96	0,11	-	5,79	8,97	0,02 ^b	0,78
	pH	Linear	4,67	0,02	-	-	5,99	372,38	0,00 ^b	0,98
12	CE	Quadrático	3,42	0,00	0,00	-	5,79	8,25	0,02 ^b	0,77
	ST	Quadrático	32389,7	-38,92	0,18	-	5,79	2,13	0,21	0,46
	DQO	Quadrático	55368,0	-97,48	0,25	-	5,79	21,40	0,00 ^b	0,90

^b significativo ao nível de 5 % pelo teste F

Para as demais variáveis (CE, ST e DQO), os modelos que mais se ajustaram variaram entre linear, quadrático e cúbico nos experimentos para as ARC's 1 e 2. Teixeira *et al.*,⁵¹ estudando a aplicação do ácido fólico no tratamento da ARC, encontraram equações de polinômio de grau três para o decaimento da DQO no tempo. Já Eustáquio Junior *et al.*,²⁷ avaliando a eficiência de aeração em cascatas no tratamento da ARC, encontraram que um modelo de primeiro grau foi significativo (a 1 %) para explicar o comportamento da DQO no tempo. O relatado pelos autores e encontrado nesse estudo, reforça a hipótese de comportamento diferentes das variáveis entre os experimentos, denotando que há

necessidade de realizar ensaios posteriores para verificar essas relações.

Em relação aos ensaios, detecta-se que o 6 e 7 da ARC1 apresentaram ajustes significativos (a 10 %) em todos os modelos testados para as variáveis. O encontrado por estar relacionado à melhor configuração do reator em DP (20 mm), DC (75 e 50 A m², ensaios 6 e 7, respectivamente) e o TRH (4,12 min.), otimizando a geração de gases, formação de hidróxidos de Alumínio e tempo, para que a flotação e as reações físico-químicas acontecessem. As curvas ajustadas para esse ensaios seguem apresentadas na Figura 4 e 5.

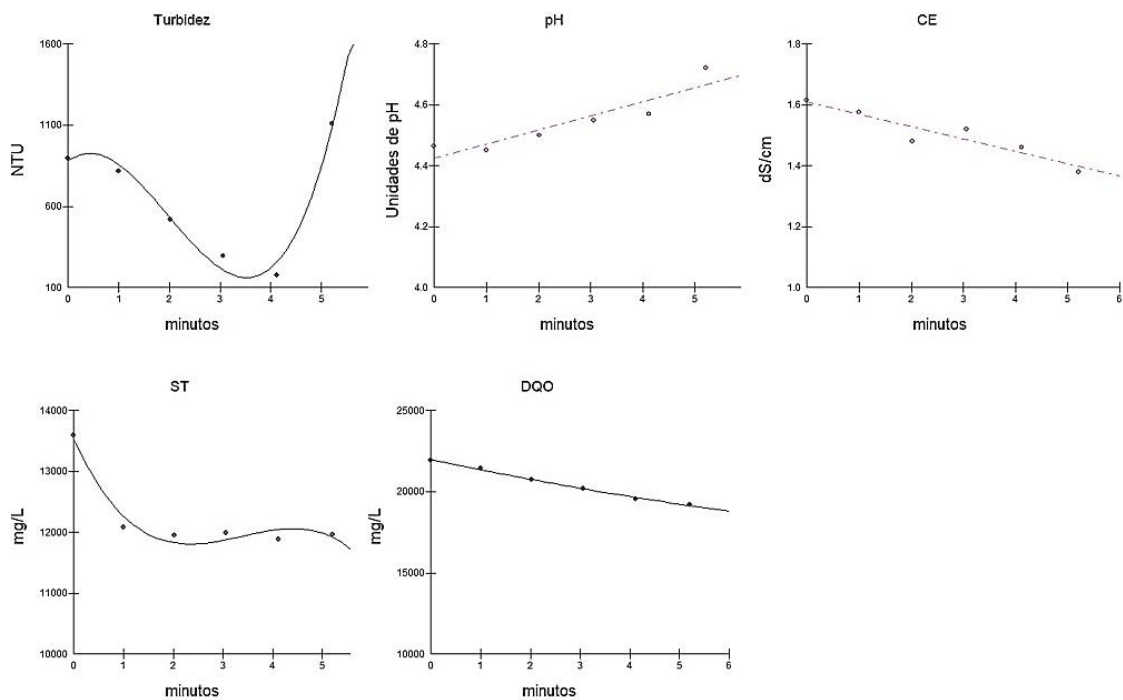


Figura 4. Curvas do comportamento no tempo das variáveis analisadas Turbidez, pH, Condutividade Elétrica (CE), Sólidos totais (ST) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) no ensaio 6 do tratamento da Água Residuária do Café sem recirculação (ARC1)

As equações 1 a 5 que descrevem o comportamento das variáveis no ensaio 6 para a ARC1 seguem:

$$\text{Turbidez} : 878,2 + 232,1 \cdot x - 305,0 \cdot x^2 + 51,5 \cdot x^3 \quad (1)$$

$$\text{pH} = 4,423 + 0,047 \cdot x \quad (2)$$

$$\text{CE} = 1,609 - 0,041 \cdot x \quad (3)$$

$$\text{ST} = 13530,4 - 1789,4 \cdot x + 584,7 \cdot x^2 - 57,7 \cdot x^3 \quad (4)$$

$$\text{DQO} = 21978,2 - 646,5 \cdot x + 19,3 \cdot x^2 \quad (5)$$

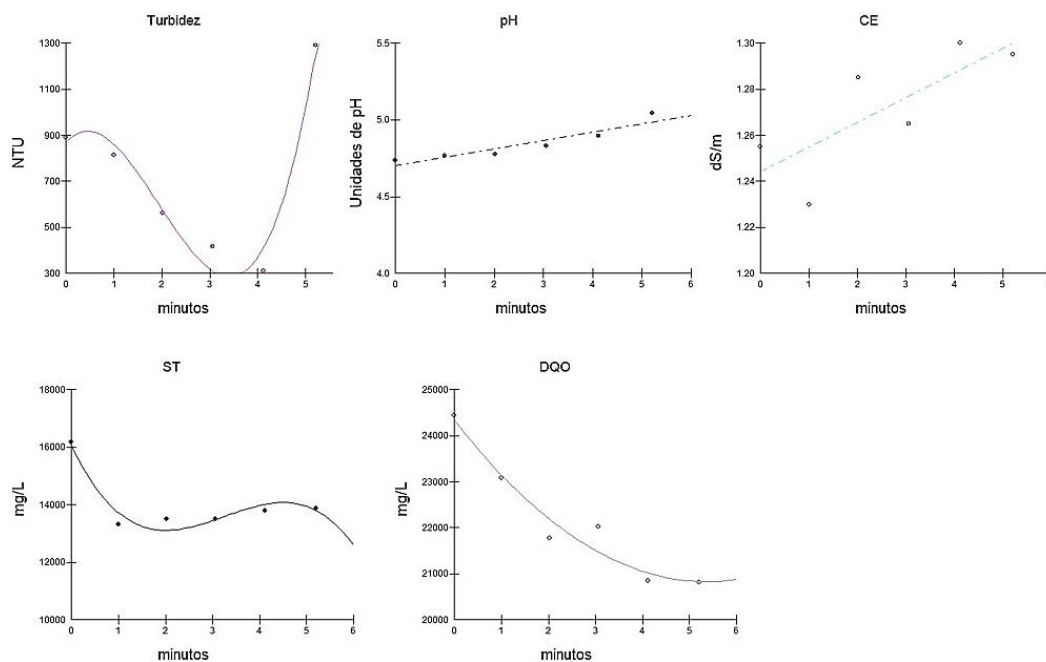


Figura 5. Curvas do comportamento no tempo das variáveis analisadas Turbidez, pH, Condutividade Elétrica (CE), Sólidos totais (ST) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) no ensaio 7 do tratamento da Água Residuária do Café sem recirculação (ARC1)

As equações 6 a 10 que descrevem o comportamento das variáveis no ensaio 7 para a ARC1 seguem:

$$\text{Turbidez} : 869,8 + 222,1.x - 280,8.x^2 + 48,5.x^3 \quad (6)$$

$$\text{pH} = 4,70 + 0,055.x \quad (7)$$

$$\text{CE} = 1,244 + 0,011.x \quad (8)$$

$$\text{ST} = 16050,9 - 3432,8.x + 1232,8.x^2 - 126,1.x^3 \quad (9)$$

$$\text{DQO} = 24335,1 - 1310,2.x + 122,3.x^2 \quad (10)$$

Para a ARC2, evidenciou-se que os ensaios 4 e 5 apresentaram ajustes significativos (a 5 %) em todos os modelos testados para as variáveis. O citado estar relacionado a configuração do reator em DP (10 e 20 mm), DC (25 e 100 A m² e TRH (160,92 e 50,53 min.), para os ensaios 4 e 5, respectivamente). Os

níveis citados podem ter otimizado a geração de gases, formação de hidróxidos de Alumínio e tempo, para que a flotação e as reações físico-químicas acontecessem. As curvas ajustadas para esse ensaios seguem apresentadas na Figura 6 e 7.

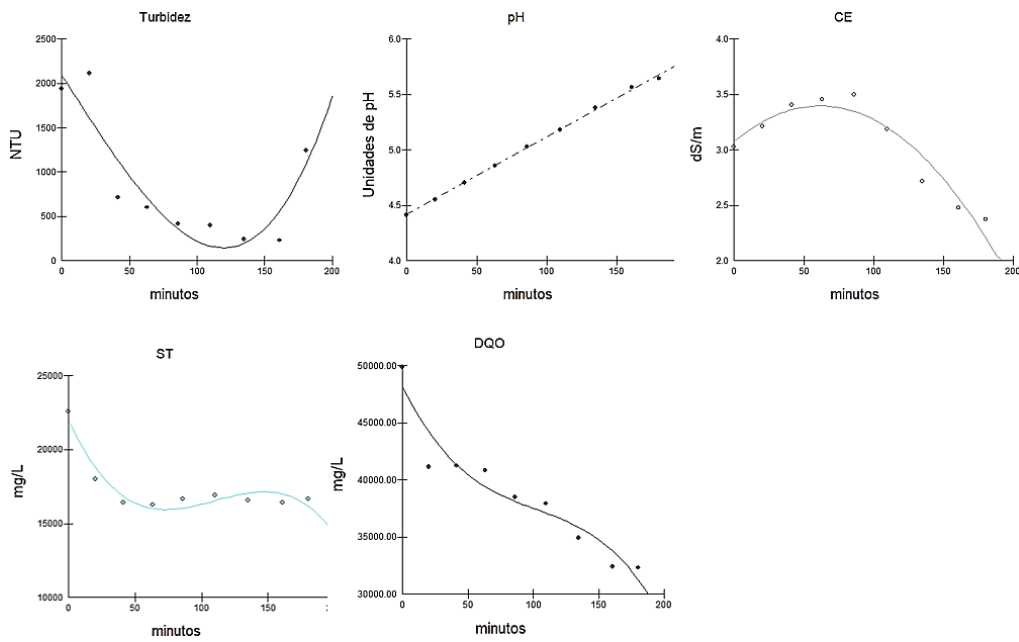


Figura 6. Curvas do comportamento no tempo das variáveis analisadas Turbidez, pH, Condutividade Elétrica (CE), Sólidos totais (ST) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) no ensaio 4 do tratamento da Água Residuária do Café com recirculação (ARC2)

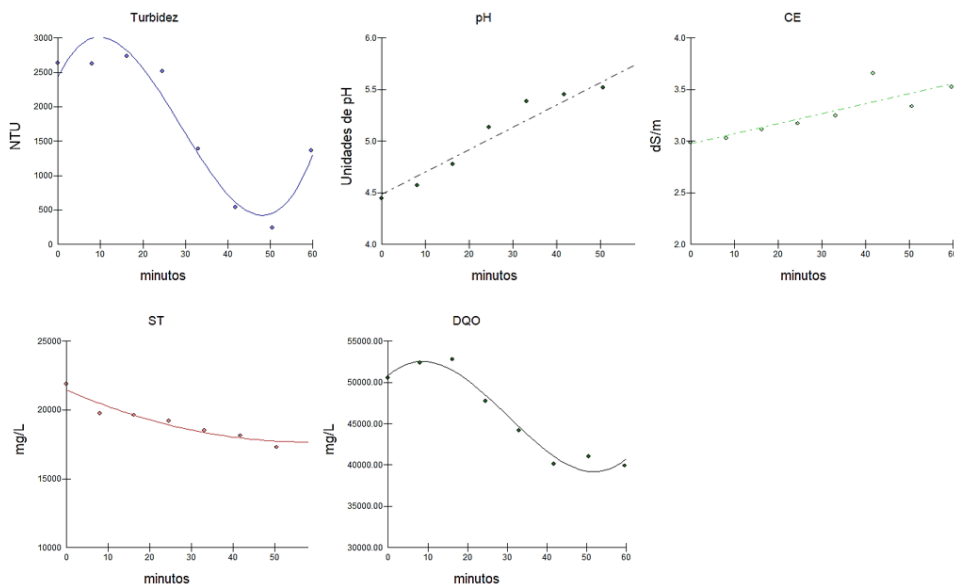


Figura 7. Curvas do comportamento no tempo das variáveis analisadas Turbidez, pH, Condutividade Elétrica (CE), Sólidos totais (ST) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) no ensaio 5 do tratamento da Água Residuária do Café com recirculação (ARC2)

As equações 11 a 15 que descrevem o comportamento das variáveis no ensaio 4 para a ARC2 seguem:

$$\text{Turbidez} : 2086,1 - 23,37.x - 0,02.x^2 \quad (11)$$

$$\text{pH} = 4,42 + 0,01.x \quad (12)$$

$$\text{CE} = 3,08 + 0,01.x \quad (13)$$

$$\text{ST} = 22029,9 - 199,05.x + 2,03.x^2 \quad (14)$$

$$\text{DQO} = 48196,3 - 232,97.x + 1,87.x^2 \quad (15)$$

As equações 16 a 20 que descrevem o comportamento das variáveis no ensaio 5 para a ARC2 seguem:

$$\text{Turbidez} : 2437,7 - 127,05.x - 7,88.x^2 \quad (16)$$

$$\text{pH} = 4,49 + 0,02.x \quad (17)$$

$$\text{CE} = 2,97 + 0,01.x \quad (18)$$

$$\text{ST} = 21449,8 - 131,68.x + 1,15.x^2 \quad (19)$$

$$\text{DQO} = 50767,0 + 440,98.x - 29,93.x^2 + 0,3x^3 \quad (20)$$

4. Conclusão

A interferência na eficiência de remoção turbidez pela incorporação de produtos da eletrólise pode ser considerado um limitante no TRH;

O TRH ideal depende principalmente da DC aplicada e das características do efluente, variando de 4,12 a 29,78 min na ARC1 e de 20,62 a 161,80 min. na ARC2 nesse estudo;

A eficiência de remoção dos ST e DQO no efluente estudado está limitada à presença em grandes teores de outros compostos, como os sólidos dissolvidos, açúcares totais, compostos orgânicos, que não são removidos pelo tratamento eletrolítico;

A melhor condição de operação foi obtida na configuração de DP de 20 mm, DC 75 e 50 A m² e TRH de 4,12 min. no tratamento da

ARC1 e para a ARC2 DP 10 e 20 mm, DC 25 e 100 A m² e TRH de 160,92 e 50,53 min, respectivamente.

Alternativas de disposição do lodo gerado no sistema necessitam de estudos específicos de toxicidade às plantas e potencial nutricional.

Referências Bibliográficas

¹ Borém, F. M.; *Pós-colheita do café*, Editora UFLA: Lavras, 2008.

² Matos, A. T.; Cabanellas, C. F. G.; Cecon, P. R.; Brasil, M. S.; Mudado, C. S. Efeito da concentração de coagulantes e do pH da solução na turbidez da água, em recirculação, utilizada no processamento dos frutos do cafeeiro. *Engenharia Agrícola Jaboticabal* **2007**, 27, 544. [CrossRef]

- ³ Campos, C. M. M.; Prado, M. A. C.; Pereira, E. L. Caracterização físico-química, bioquímica e energética da água residuária do café processado por via úmida. *Bioscience Journal* **2010**, *26*, 514. [[Link](#)]
- ⁴ Fia, R.; Matos, A. T.; Matos, M. P.; Abreu, E. C.; Fia, F. R. L. Tratamento das águas do processamento dos frutos do cafeeiro em filtro anaeróbio seguido por sistema alagado construído: I - Remoção de matéria orgânica. *Engenharia Agrícola* **2010**, *30*, 1192. [[CrossRef](#)]
- ⁵ Oliveira, R. A.; Bruno, N. M. N. Start-up of horizontal anaerobic reactors with sludge blanket and fixed bed for wastewater treatment from coffee processing by wet method. *Engenharia Agrícola* **2013**, *33*, 353. [[CrossRef](#)]
- ⁶ Silva, J. S.; Donzeles, S. M. L.; Soares, S. F.; Moreli, A. P.; Vitor, D. G.; *Lavadores e Sistema de Reúso da Água no Preparo do Café*. Embrapa Café: Brasília, 2014. [[Link](#)]
- ⁷ Fia, R., Matos, A. T.; Queiroz, M. E. L. R. de.; Cecon, P. R.; Fia, F. R. L. Desempenho de sistemas alagados no tratamento de águas residuárias do processamento dos frutos do cafeeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* **2010**, *14*, 1323. [[CrossRef](#)]
- ⁸ Bruno, M.; Oliveira, R. A. de.; Tratamento anaeróbio de águas residuárias do beneficiamento de café por via úmida em reatores UASB. *Engenharia Agrícola* **2008**, *28*, 364. [[CrossRef](#)]
- ⁹ Kondo, M. M.; Moraes, R. G. M.; Andrade, S. J.; Silva, M. R. A. Processos fenton e foto-fenton no tratamento de águas dos frutos do cafeeiro. *Coffee Science* **2014**, *9*, 506. [[CrossRef](#)]
- ¹⁰ Aquino Neto, S.; De Andrade, A. R.; Electrochimica. *Acta* **2009**, *54*, 2039. [[Link](#)]
- ¹¹ Kabdaşlı, I.; Arslan-Alaton, I.; Ölmez-Hanci, T.; Tünay, O. Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review. *Environmental Technology Reviews* **2012**, *1*, 2. [[CrossRef](#)]
- ¹² Butler, E.; Hung, Y.; Yeh, R. Y.; Al Ahmad, M. S. Electrocoagulation in Wastewater Treatment. *Water* **2011**, *3*, 495 [[CrossRef](#)]
- ¹³ Cerqueira, A. A.; Souza, P. S. A.; Marques, M. R. C. Effects of direct and alternating current on the treatment of oily water in an electroflocculation process. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* **2014**, *31*, 693. [[CrossRef](#)]
- ¹⁴ Chen, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology* **2004**, *38*, 11. [[CrossRef](#)]
- ¹⁵ Kobya M, Demirbas E., Can O.T. Treatment of levafix orange textile dye solution by electrocoagulation. *Journal Hazard Mater* **2006**, *132*, 283 [[CrossRef](#)]
- ¹⁶ Cerqueira, A., Russo, C., Marques, M. R. C. Electroflocculation for textile wastewater treatment. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* **2009**, *26*, 659. [[CrossRef](#)]
- ¹⁷ Bensadok K., Hanafi N. El, Lopicque F. Electrochemical treatment of dairy effluent using combined Al and Ti/Ptelectrodes system. *Desalination* **2001**, *280*, 280 [[CrossRef](#)]
- ¹⁸ Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT; *Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores*: 9898. Rio de Janeiro, 1987. [[Link](#)]
- ¹⁹ Albarici, T. R.; Freitas, D. M.; Pessoa, J. D. C. *Protocolos de análise para polpa de açaí: um guia prático de consulta*. São Carlos: SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2009. [[Link](#)]
- ²⁰ American Public Health Association; *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater*. 22th ed., APHA: Washington, 2012. [[Link](#)]
- ²¹ Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT; *Água - Determinação de potássio e sódio - Método da espectrometria de absorção atômica por chama*: 13810. Rio de Janeiro, 1997. [[Link](#)]

- ²² Cetesb. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; *Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas de amostragem*. Apêndice A, Série de relatórios. Secretaria de Meio Ambiente, Governo do Estado de São Paulo, 2008. [\[Link\]](#)
- ²³ Mollah, M. Y. A.; Morkovsky, P.; Gomes, J. A. G.; Kesmez, M.; Parga, J.; Cocke, D. L. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal Of Hazardous Materials* **2004**, *1*, 199. [\[CrossRef\]](#)
- ²⁴ Carmona M.; Khemis M.; Leclerc J. P. A simple model to predict the removal of oil suspensions from water using the electrocoagulation technique. *Chemical Engineering Science* **2006**, *6*, 18. [\[CrossRef\]](#)
- ²⁵ Barbosa, I. M.; Teran, F. J. C. Eletrocoagulação-floculação aplicada ao tratamento de efluentes gerados na indústria e reciclagem de plásticos. *Holos Environment* **2009**, *9*, 93. [\[CrossRef\]](#)
- ²⁶ Ribeiro Jr., J. I.; *Análises estatísticas no SAEG*. UFV: Viçosa, 301 p., 2001. [\[Link\]](#)
- ²⁷ Eustáquio Junior, V.; Matos, A. T.; Lo Monaco, P. A. V.; Matos, M. P. de. Eficiência de sistemas de aeração em cascatas no tratamento de águas residuárias do café. *Coffee Science* **2014**, *9*, 435. [\[CrossRef\]](#)
- ²⁸ Matos, A. T. De.; Eustáquio Júnior, V. Matos, M. P. de. Eficiência de aeração e consumo de oxigênio no tratamento de água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro em sistema de aeração em cascata. *Engenharia Agrícola Jaboticabal* **2015**, *35*, 941. [\[CrossRef\]](#)
- ²⁹ Selvamurugan, M.; Doraisamy, P.; Maheswari, M., Nandakumar, N. B. High rate anaerobic treatment of coffee processing wastewater using upflow anaerobic hybrid reactor. *Iranian Journal Environmental Health Science and Engineering* **2010**, *7*, 129. [\[Link\]](#)
- ³⁰ Ulavi, S.; Kumar, B. M. Electrochemical coagulation followed by sequencing batch reactor for treating coffee pulping wastewater. *International Journal of ChemTech Research* **2013**, *5*, 1387. [\[Link\]](#)
- ³¹ Peralta, Y. M.; Sanabria, N. R.; Carriazo, J. G.; Moreno, S.; Molina, R. Catalytic wet hydrogen peroxide oxidation of phenolic compounds in coffee wastewater using Al-Fe-pillared clay extrudates. *Desalination and Water Treatment*. **2014**, *1*, 1944. [\[CrossRef\]](#)
- ³² Combatt, M. P. M.; Mendonca, R. C. S.; Valente, G. De F. S.; Silva, C. M. Validação do processo de eletrocoagulação e avaliação da eletrodissolução de eletrodos no tratamento de efluentes de abatedouros de aves. *Química Nova* **2017**, *40*, 447. [\[CrossRef\]](#)
- ³³ Valente, G. F. S.; *Tese de Doutorado*, Universidade Federal de Viçosa, Brasil, 2012. [\[Link\]](#)
- ³⁴ Kinraide, T. B. Identity of the rhizotoxic aluminium species. *Plant and Soil* **1991**, *134*, 1. [\[CrossRef\]](#)
- ³⁵ Vu, T. P.; Vogel, A.; Kern, F.; Platz, S.; Menzel, U.; Gadow, R. Characteristics of an electrocoagulation-electroflotation process in separating powdered activated carbon from urban wastewater effluente. *Separation and Purification Technology* **2014**, *134*, 196. [\[CrossRef\]](#)
- ³⁶ Kannan N.; Karthikeyan G.; Tamilselvan N. Comparison of treatment potantil of electrocoagulation of distillery effluent with and without activated Areca catechu nut carbon. *Journal of Hazardous Materials* **2006**, *137*, 1 [\[CrossRef\]](#)
- ³⁷ Benazzi, T. L.; Di Luccio, M.; Dallago, R. M.; Steffens, J.; Mores, R.; Nascimento, M. S.; Krebs, J.; Ceni, G. Continuous flow electrocoagulation in the treatment of wastewater from dairy industries. *Water Science and Technology* **2016**, *73*, 1418. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- ³⁸ Valente, G. F. S.; Mendonça, R. C. S.; Pereira, J. A. M. The efficiency of electrocoagulation using aluminum electrodes in treating wastewater from a dairy industry. *Ciência Rural* **2015**, *45*, 1713. [\[CrossRef\]](#)
- ³⁹ Holt, P. K.; Barton, G. W.; Mitchell, C. A. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere* **2005**, *59*, 355. [\[CrossRef\]](#)

- ⁴⁰ Kuokkanen, V.; Kuokkanen, T.; Rämö, J.; Lassi, U.; Recent applications of electrocoagulation in treatment of water and wastewater- A Review. *Green and Sustainable Chemistry* **2013**, *3*, 89. [CrossRef]
- ⁴¹ Valente, G. F. S.; Mendonça, R. C. S.; Pereira, J. A. M.; Felix, L. B.; The efficiency of electrocoagulation in treating wastewater from a dairy industry, Part I: Iron electrodes. *Journal of Environmental Science and Health* **2012**, *47*, 355. [CrossRef] [PubMed]
- ⁴² Casillas, H. A. M.; Cocke, D. L.; Gomes, J. A. G.; Morkovsky, P.; Parga, J. R.; Peterson, E. Electrocoagulation mechanism for COD removal. *Separation and Purification Technology* **2007**, *56*, 1. [CrossRef]
- ⁴³ Levenspiel O.; *Chemical Reaction Engineering*: 3rd ed. John Wiley & Sons: New York, 2000.
- ⁴⁴ Benazzi, T. L.; Dallago, R. M.; Steffens, J.; Bopsin, M. H. Effect of pH and conductivity in the electrocoagulation treatment of synthetic dairy effluent. *Revista Ciências Exatas e Naturais* **2015**, *17*, 1. [CrossRef]
- ⁴⁵ Chen X.; Chen G.; Yue P.L.; Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology* **2000**, *19*, 1. [CrossRef]
- ⁴⁶ Daneshvar, N.; Ashassi-Sorkhabi, H.; Kasiri, M. B.; Decolorization of dye solution containing acid red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections. *Journal of Hazardous Materials* **2004**, *112*, 1. [CrossRef] [PubMed]
- ⁴⁷ Roa-Morales G.; Campos-Medina E.; Aguilera-Cotero J.; Bilyeu B.; Barrera-Díaz C. Aluminum electrocoagulation with peroxide applied to wastewater from pasta and cookie processing. *Separation and Purification Technology* **2007**, *54*, 1. [CrossRef]
- ⁴⁸ Tchamango S., Nansu-Njiki C. P.; Ngameni E., Hadjiev D.; Darchen A. Treatment of dairy effluents by electrocoagulation using aluminium electrodes. *Science of the Total Environment* **2010**, *408*, 1. [CrossRef]
- ⁴⁹ Sengil A. E; Ozacar M. Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes, *Journal of Hazardous Materials* **2006**, *137*, 1. [CrossRef]
- ⁵⁰ Asha. G.; Kumar, B. M. Evaluation of electrochemical process for treating coffee processing wastewater using aluminum electrodes. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology* **2015**, *9*, 74. [CrossRef]
- ⁵¹ Teixeira, D. L.; Matos, A. T.; Rossmann, M. Ácido fólico no tratamento da água residuária do café processado por via úmida. *Coffee Science* **2012**, *7*, 91. [CrossRef]