



Avaliação da estabilidade de operação de um reator eletroquímico, alimentado por painel fotovoltaico, aplicado ao tratamento de efluente têxtil

**Edilaine Cardoso Dantas Reghini ¹, Bruna Mayer ², Eduardo Eyng ³,
Laercio Mantovani Frare ⁴**

¹ Discente do Curso de Engenharia Ambiental/ UTFPR (edilainereghini@gmail.com)

² Discente do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais/ UTFPR
(brunamayyer@gmail.com)

³ Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais/ UTFPR
(eduardoe yng@utfpr.edu.br)

⁴ Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais/UTFPR
(laercio@utfpr.edu.br)

Resumo

As indústrias têxteis são potenciais contribuintes para a contaminação ambiental dos corpos hídricos, devido ao grande volume e complexidade dos efluentes gerados, que favorecem a disposição inadequada. Neste contexto, surge a necessidade de tratamentos simples, econômicos e eficientes para estes efluentes, como a eletrocoagulação. Esta técnica associada a uma fonte alternativa de geração de energia, como os painéis fotovoltaicos, tornam o processo ainda mais eficaz e menos poluente. Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar a remoção do corante Reativo Azul 5G de solução aquosa utilizando um reator eletroquímico de fluxo contínuo com eletrodos de ferro e grafite, além de analisar a viabilidade técnica da aplicação de painel fotovoltaico como fonte de energia e avaliar da estabilidade do processo por meio do Controle Estatístico do Processo (CEP). Foram analisadas três condições distintas de aplicação de corrente e eletrodos, utilizando os dados de radiação solar da estação meteorológica da UTFPR-MD para identificar causas de instabilidades no processo. As taxas de remoção mais elevadas foram observadas em dias de céu claro e com poucas nuvens, sendo que os eletrodos de ferro foram mais eficientes no tratamento. Foi possível evidenciar a viabilidade técnica da utilização do painel fotovoltaico como fonte parcial de energia, mas as oscilações meteorológicas fazem com que seja necessário implementar o controle do processo através do uso de uma fonte complementar de energia, acionada conforme necessidade constatada por este.

Palavras-chave: Eletrocoagulação. Controle estatístico de processo. Corante.

Área Temática: Águas Residuárias

Application of statistical control of processes in an electrochemical reactor for effluent treatment: evaluation of process stability through photovoltaic module feeding

Abstract

The textile industries are potential contributors to the environmental contamination of the water bodies, due to the large volume and complexity of the generated effluents, which favor



the inadequate disposal. In this context, there is a need for simple, economical and efficient treatments for these effluents, such as electrocoagulation. This technique associated with an alternative source of energy generation, such as photovoltaic panels, make the process even more efficient and less polluting. Thus, the objective of this work was to remove the Blue 5G Reactive dye from aqueous solution using a continuous flow electrochemical reactor with iron and graphite electrodes, besides analyzing the technical feasibility of the photovoltaic panel application as an energy source and evaluating the stability of the process through Statistical Process Control (SPC). Three different current and electrode application conditions were analyzed using solar radiation data from the UTFPR-MD meteorological station to identify causes of instabilities in the process. The highest removal rates were observed on clear and cloudy days, with iron electrodes being more efficient in treatment. It was possible to demonstrate the technical feasibility of the use of the photovoltaic panel as a partial source of energy, but the meteorological oscillations make it necessary to implement the control of the process using a complementary source of energy, triggered according to the need verified by this one.

Key words: Electrocoagulation. Statistical process control. Dye.

Theme Area: wastewater

1 Introdução

As indústrias têxteis constituem um dos setores mais poluentes em termos de volume e complexidade dos efluentes. As operações de tingimento e acabamento contribuem de forma significativa para a geração de águas residuais (ZAROUAL et. al, 2006) e as frequentes alterações no corante, utilizado durante o processo produtivo, fazem com que este apresente características específicas, como cor intensa, alta demanda química de oxigênio (DQO), grande quantidade de sólidos dissolvidos e variação de pH (CERQUEIRA et. al, 2009).

A presença de corante faz ainda com que este efluente não seja apenas esteticamente poluente, mas também, interfira nos processos biológicos aquáticos, através da redução da penetração de luz nos corpos hídricos. Além disso, por conter elevada quantidade de produtos químicos, pode se tornar tóxico e carcinogênico (ZAROUAL et. al, 2006).

Assim, para garantir a disposição segura, sem prejuízos ao meio ambiente, os efluentes têxteis devem ser tratados, garantindo os limites seguros de descarga. Existem várias técnicas químicas, físicas, biológicas e até mesmo avançadas de tratamento para este tipo de efluente, porém cada uma delas apresenta suas vantagens e desvantagens (VERMA, 2017).

A eletrocoagulação é uma técnica aplicada para remoção de poluentes dos mais diversos efluentes, sendo muito utilizada no tratamento de efluentes de tintura e indústria têxtil devido à sua capacidade ambiental, versatilidade, eficiência energética, segurança, seletividade e rentabilidade. Esta técnica emprega equipamentos simples e de fácil operação, facilitando sua aplicação. O processo envolve tanto fenômenos químicos quanto físicos, utilizando eletrodos para fornecer íons para o sistema poluente. O eletrodo, ou o conjunto deles, fica conectado a uma fonte de corrente externa, fazendo com que haja geração de íons hidróxido metálicos, devido a oxidação eletrolítica do ânodo de sacrifício. Estes íons hidróxido metálicos atuam como coagulantes e removem os poluentes da solução (KHANDEGAR & SAROHA, 2013).

Para tornar as técnicas de tratamento de efluentes já existentes ainda mais eficazes e menos poluentes, novas tecnologias e aprimoramentos vem sendo desenvolvidos com o intuito de reduzir os impactos causados pelo próprio sistema de tratamento. Uma das alternativas é a substituição das fontes convencionais de energia por fontes limpas e



renováveis, como a energia fotovoltaica, que tem sido amplamente difundida. A aplicação de painéis fotovoltaicos, para geração de energia elétrica, é uma tecnologia promissora, já que é livre, abundante, descentralizada, possui longa vida e tem baixo custo de manutenção dos sistemas (TONES, 2015).

Paralelamente a isso, faz-se necessária a análise continuada do sistema de tratamento, que pode ser feita por meio do Controle Estatístico de Processo (CEP), que consiste na coleta continuada de dados, monitoramento da variabilidade e instabilidade ao longo do tempo, validando estatisticamente, ou não, o processo (ALENCAR et.al, 2004).

Desse modo, o presente estudo objetivou promover a remoção do Corante Reativo Azul 5G utilizando um reator eletroquímico com eletrodos de sacrifício de ferro e grafite, e aplicar o controle estatístico do processo com vistas a avaliar a estabilidade do sistema de tratamento quando a energia provém de um painel fotovoltaico sujeito as intempéries climáticas.

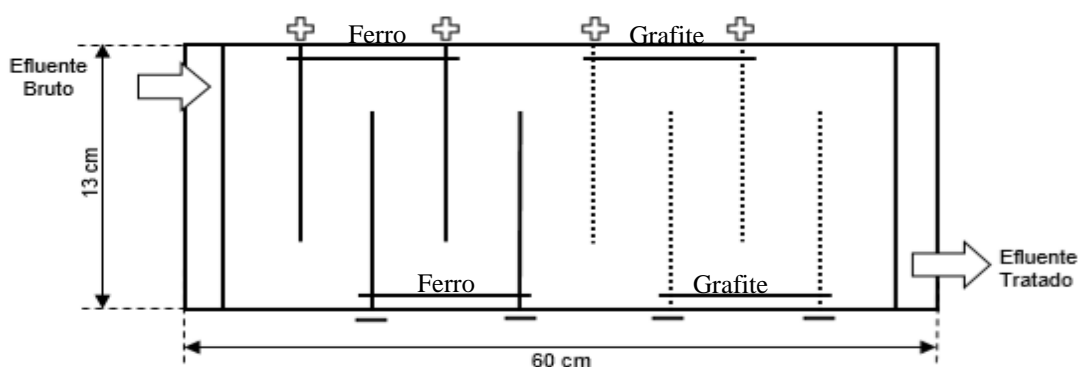
2 Metodologia

Para a realização dos ensaios foram preparadas soluções com concentração de 50 mg.L⁻¹ de corante reativo Azul 5G e 2g. L⁻¹ de cloreto de sódio. O reator eletroquímico era constituído por uma cuba de vidro temperado com capacidade para 8,5 litros. A cuba era equipada com eletrodos de ferro e grafite, com área útil de 99 cm² e espaçados 6 cm entre si. Os eletrodos de mesmo material foram unidos por uma barra para possibilitar a distribuição em série (Figura 1). Estes eram trocados sempre que ocorresse a redução da área útil. O efluente foi armazenado em galões de 20 L e o fluxo foi mantido por uma bomba submersa.

Para o fornecimento de corrente elétrica fez-se uso de duas fontes (Instrutherm - FA3005 e FA3050), uma placa fotovoltaica e cabos do tipo “jacaré”.

O módulo contava com defletores na entrada e saída para contenção do lodo.

Figura 1 – Esquema do módulo de tratamento para as condições analisadas



No início de cada ensaio, o reator foi alimentado pela energia elétrica proveniente das fontes de corrente contínua. Assim que o estado estacionário era alcançado, a energia passou a ser fornecida pelo painel fotovoltaico. O TRH utilizado foi de 20 minutos e para assegurar que o estado estacionário fosse atingido, adotou-se um fator de segurança de 2,5 vezes o TRH, ou seja, a substituição da fonte de energia somente aconteceu depois de transcorridos 50 minutos de operação. Foram analisadas três condições distintas de aplicação de corrente e material do eletrodo para tratar o efluente (Quadro 1). As amostragens foram feitas em duplicata. Para o efluente tratado, estas foram realizadas das 9h15min às 17h, com intervalos de tempo 15 minutos entre a primeira e segunda coleta e de 30 minutos para as demais. Já



para o efluente bruto, as amostras foram coletadas com intervalos de 1 hora, entre as 9h e as 17h.

Quadro 1 – Condições aplicadas nos ensaios

Condição	Número de eletrodos		Alimentação distribuída aos pares de eletrodos	
	Ferro	Grafite	Ferro	Grafite
A	2 pares	2 pares	4 A	5 A
B	2 pares	2 pares	1 A	5 A
C	2 pares		2 A	

Após a coleta, as amostras foram centrifugadas por 15 minutos para garantir a decantação do ferro residual. Foram então, realizadas as leituras de absorbância no espectrofotômetro de feixe simples da (Perkinelmer - modelo Lambda XLS), no comprimento de onda de 618 nm.

Para o cálculo dos limites de controle fez-se uso do software Statistica 10.0, sendo considerados para tal, os valores de remoção percentual das amostras do primeiro dia de ensaio em cada uma das condições. Os limites de controle foram utilizados na elaboração dos gráficos de controle, sendo analisadas as amostragens realizadas ao longo dos dias subsequentes de monitoramento. Para a avaliação da possível interferência da radiação solar no controle estatístico do tratamento, contou-se com os dados da estação meteorológica da UTFPR- MD referentes ao período dos ensaios.

3 Resultados e discussão

Foram calculadas as Remoções Percentuais de Corante (RC) (Tabela 1) e os limites de controle para cada condição utilizando os valores das amostras do primeiro dia (Tabela 2).

Tabela 1 - RC para primeiro dia de análise das condições A, B e C

Condição Meteorológica	Condição A		Condição B		Condição C	
	Céu claro		Céu claro com poucas nuvens		Parcialmente nublado	
Hora coleta	RC 1 (%)	RC 2 (%)	RC 1 (%)	RC 2 (%)	RC 1 (%)	RC 2 (%)
09:15	91,86	92,16	40,80	44,62	36,41	39,75
09:30	95,87	96,12	45,26	37,37	60,58	70,19
10:00	95,74	95,07	43,59	39,64	85,10	86,62
10:30	94,06	95,40	44,46	44,50	84,72	83,66
11:00	96,29	95,78	53,11	50,84	85,22	88,02
11:30	97,34	96,92	52,27	47,73	84,55	87,30
12:00	97,47	96,92	53,47	52,07	47,67	46,49
12:30	97,85	97,55	54,34	53,27	70,49	73,84
13:00	97,85	97,77	54,14	55,26	39,08	41,57
13:30	98,23	98,19	38,80	46,57	47,67	39,12
14:00	98,23	98,06	42,07	47,73	72,18	82,22
14:30	97,68	97,43	53,71	43,63	55,21	58,43
15:00	97,68	97,43	48,76	47,21	39,20	40,01
15:30	97,98	97,68	53,90	53,07	60,75	58,30
16:00	97,39	97,93	52,87	52,79	86,28	85,61
16:30	97,18	97,85	52,67	52,75	83,28	85,31
17:00	97,34	97,34	50,84	58,21	46,40	38,19



Tabela 2 – Limites de controle

Condição	Limite Inferior de Controle (LIC) %	Linha Central (LC) %	Limite Superior de Controle (LSC) %
A	95,014	96,813	98,613
B	41,040	48,891	56,743
C	27,389	64,395	101,40

Na Tabela 3 são apresentados os dados de radiação solar média ($W.m^{-2}$) nos dias de amostragem para as condições A, B e C.

Tabela 3 - Dados de radiação solar ($W.m^{-2}$) da estação meteorológica UTFPR- MD

	Condição A			Condição B		Condição C	
	1º dia	2º dia	3º dia	1º dia	2º dia	1º dia	2º dia
Radiação Solar Média ($W.m^{-2}$)	503,2	521,3	513,2	507,5	512,7	479,0	357,2
Desvio Padrão	150,0	132,2	139,2	141,1	139,4	139,7	231,4
Condição Meteorológica	Céu claro	Céu claro	Céu claro com poucas nuvens	Céu claro com poucas nuvens	Céu claro com poucas nuvens	Parcialmente nublado	Parcialmente nublado

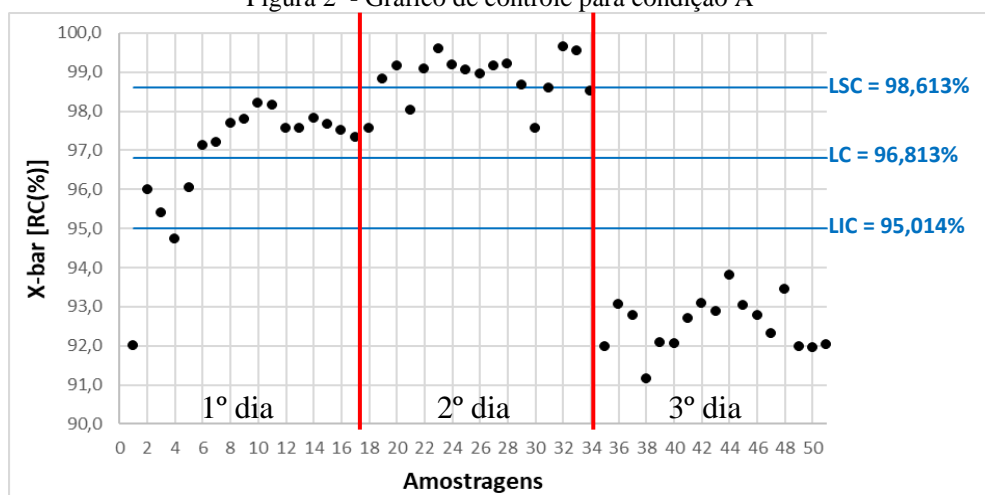
A partir dos limites de controle (Tabela 2), dos dados de radiação solar (Tabela 3) e dos dados de remoção percentual média de corante (Tabela 4) foram construídos os gráficos de controle (Figuras 2, 3 e 4).

Tabela 4 - Remoção percentual média de corante para as condições A, B e C

Hora coleta	Remoção média de corante (%)			
	Condição A		Condição B	Condição C
	2º dia	3º dia	2º dia	2º dia
09:15	97,57	91,99	45,78	39,70
09:30	98,84	93,06	43,99	68,20
10:00	99,15	92,77	48,45	87,57
10:30	98,03	91,17	44,96	87,84
11:00	99,09	92,09	47,44	90,13
11:30	99,60	92,05	49,48	87,63
12:00	99,20	92,71	51,36	89,36
12:30	99,05	93,08	53,08	91,13
13:00	98,94	92,89	53,27	80,89
13:30	99,15	93,82	55,30	90,13
14:00	99,22	93,04	50,17	83,39
14:30	98,67	92,77	51,03	90,01
15:00	97,57	92,32	55,45	79,63
15:30	98,61	93,45	48,11	22,14
16:00	99,64	91,99	46,92	0,12
16:30	99,54	91,95	43,97	30,54
17:00	98,52	92,03	43,17	64,60



Figura 2 - Gráfico de controle para condição A

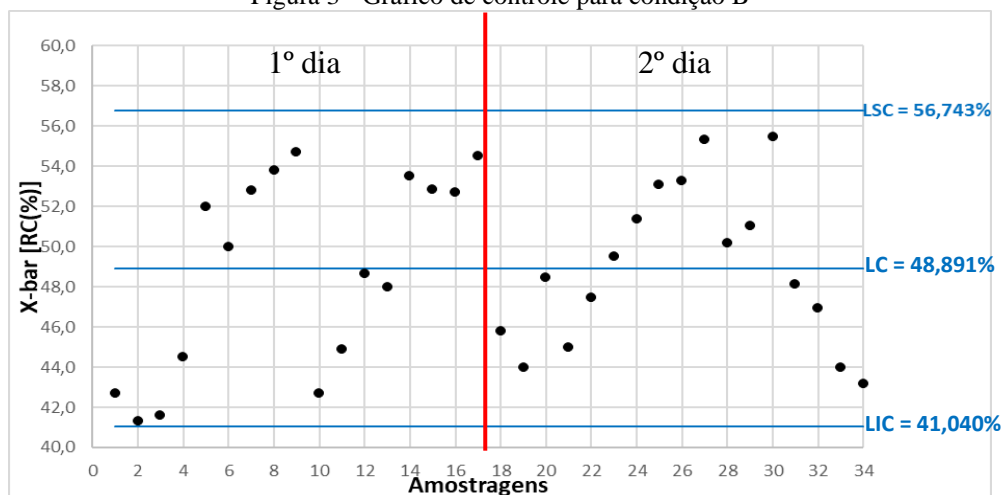


Segundo Montgomery & Runger (2012) um processo se caracteriza como fora de controle estatístico quando os pontos encontram-se em regiões externas aos limites de controle (LIC e LSC), ou quando 9 ou mais pontos consecutivos estão no mesmo lado de LC, com base nessas considerações, na condição A, o processo não esteve sob controle estatístico em nenhum dos dias analisados. Apesar disso, no segundo dia houve um deslocamento da maioria dos dados acima do LSC, demonstrando eficiência superior à esperada com base nos resultados do primeiro dia. Já no terceiro dia, todos os pontos se encontraram abaixo do LIC, evidenciando um tratamento com menor eficiência do que a esperada.

O segundo dia teve maior índice de radiação dos dias analisados, o que pode explicar a maior eficiência na remoção do corante. Porém, valores de remoção acima do necessário também merecem atenção, pois quanto maior a corrente aplicada, mais rápido é o desgaste dos eletrodos, implicando na manutenção mais frequente.

Da mesma forma, a eficiência de remoção abaixo do LIC no terceiro dia pode ser explicada pelos menores níveis de radiação solar em relação aos dias anteriores. Pontos abaixo do LIC exigem cuidado, já que demonstram queda na eficiência do tratamento. Neste caso, mesmo com os pontos estando abaixo do LIC, o percentual de remoção ainda é elevado (superior a 90%), no entanto, caso este percentual fosse reduzido seria necessário aplicar uma fonte suplementar de energia.

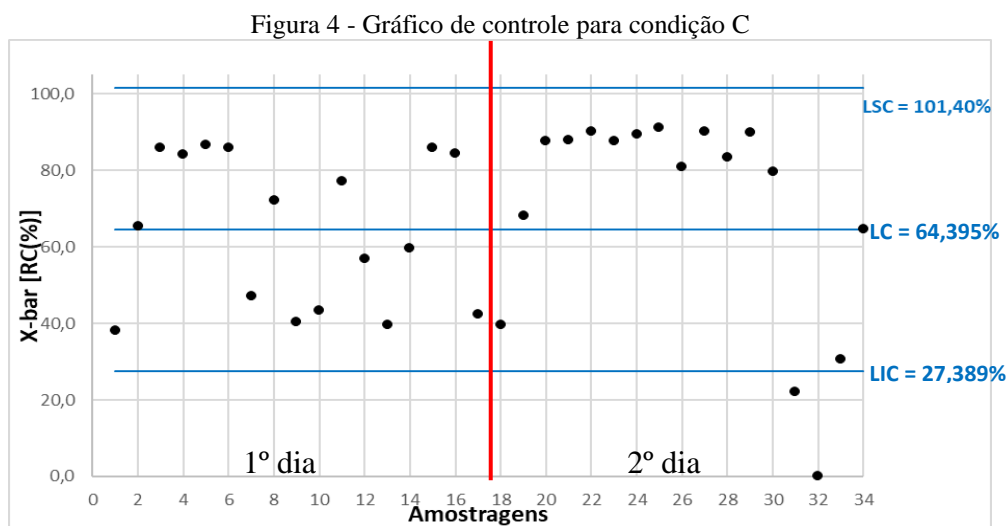
Figura 3 - Gráfico de controle para condição B



A condição B apresentou menor eficiência de remoção de corante quando comparada a



condição A. Esse resultado pode estar relacionado a redução da corrente aplicada nos eletrodos de Ferro, uma vez que os níveis de radiação para as condições A e B foram pouco discrepantes. Para o segundo dia de monitoramento, apesar da menor variação das condições meteorológicas e de radiação solar, o processo também se apresentou fora de controle estatístico. Isto porque, da amostra 21 até a 27 a remoção percentual do corante se mostrou crescente, atendendo ao critério de falta de controle estatístico: sequência de mais de 6 pontos crescentes ou decrescentes (MONTGOMERY & RUNGER, 2012).



O gráfico de controle da condição C apresentou grande amplitude, revelando oscilações nos valores de RC, que variaram entre 28 e 91%, chegando a apresentar valores próximos a zero de eficiência e abaixo do LIC, caracterizando um processo fora de controle estatístico. As amostras 31, 32 e 33, referentes ao segundo dia de análise (nos horários das 15h30min, 16h e 16h30min, respectivamente) sofreram interferências pois o módulo não estava recebendo alimentação adequada de energia e menores valores de radiação solar, comparado as amostragem anteriores, logo era esperado que apresentasse valores fora dos limites de controle. No entanto, mesmo sem a utilização dos eletrodos de grafite, obteve-se alta eficiência de remoção (acima de 85%) para a maioria das amostras, demonstrando que os eletrodos de ferro possuem maior influência no desempenho do sistema de tratamento do que os eletrodos de grafite.

4 Conclusão

A aplicação do CEP ao sistema de tratamento eletroquímico alimentado pela energia elétrica gerada por painel fotovoltaico permitiu avaliar a oscilação do sistema, bem como, analisar a viabilidade técnica do uso desse tipo de fonte alternativa de geração de energia para a remoção de poluentes, em particular do corante Reativo Azul 5G.

Devido a obtenção de elevados níveis de remoção do poluente em questão, pode-se inferir que a utilização do painel fotovoltaico, como fonte parcial de energia, apresentou-se tecnicamente viável neste estudo, principalmente em dias ensolarados e com poucas nuvens.

Cabe ponderar que, foram identificados diversos períodos nos quais o reator operou fora de controle estatístico. Em especial, pontos acima do LSC são indesejáveis sob o ponto de vista econômico, pois caracteriza que foi empregada corrente elétrica superior a necessária para o tratamento do efluente, implicando no consumo excessivo dos eletrodos de sacrifício o que reduziria a vida útil destes. Também os pontos abaixo de LIC são preocupantes, uma vez



que a queda de desempenho do sistema de tratamento pode comprometer o atendimento aos limites permissíveis de descarga em corpos hídricos.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, sugere-se que o Controle de Processos seja implementado na supervisão do sistema de tratamento. Este controlador seria responsável por manipular a corrente elétrica destinada aos eletrodos de sacrifício com vistas a controlar a remoção do corante, acionando uma fonte de energia suplementar quando necessário ou restringindo a alimentação energética proveniente do painel fotovoltaico, quando esta se apresentasse em demasia.

Referências

ALENCAR, J. R. B.; SOUZA Jr, M. B.; NETO, P. J. R.; LOPES, C. E. Uso de Controle Estatístico de Processo (CEP) para validação de processo de glibenclamida comprimidos. **Acta Farm. Bonaerense**, v. 24, p. 426-435, 2005.

CERQUEIRA, A.; RUSSO, C.; MARQUES, M. R. C. Electroflocculation for textile wastewater treatment. **Braz. J. Chem. Eng.**, São Paulo, v. 26, n. 4, dez. 2009.

KHANDEGAR, V.; SAROHA, A.K. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent e A Review. **Journal of Environmental Management**, 2013.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012. xvi, 523 p.

TONES, A. R. M. **Estudo da aplicação da técnica de eletrofloculação na remoção da cor em misturas de corantes têxteis**. 2015. 70 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Programa de Pós Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

VERMA, A. K. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation employing Fe-Al composite electrode. **Journal of Water Process Engineering**, 2017.

ZAROUAL, Z.; AZZI, M.; SAIB, N.; CHAINET, E.. Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent. **Journal of Hazardous Materials**, 2006.