

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DA ELETROCOAGULAÇÃO COM FONTES CONVENCIONAL E FOTOVOLTAICA NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE BEBIDAS

Maria Clara Ribeiro Vilaça¹; Carmem Lucia Moreira Gadelha² & Emanuel Gomes Soares³

Abstract: This article evaluates the efficiency of the electrocoagulation (EC) process applied to the treatment of industrial effluents from a beverage industry, with a comparative focus between conventional power supplies and photovoltaic solar energy. The research was conducted on a laboratory scale, using an aluminum electrolytic reactor, under 2³ factorial design, with variables such as pH, process time and electrode spacing. Quality indicators such as COD, turbidity and true color were analyzed. The results showed removal of up to 98% of turbidity and color, and 57% of COD. The photovoltaic system presented a performance similar to the conventional one, with long-term economic and environmental advantages. It is concluded that CE, especially with solar source, is a promising alternative for the treatment of industrial effluents, promoting the sustainability and improvement of the treated effluent.

Resumo: O presente artigo avalia a eficiência do processo de eletrocoagulação (EC) aplicado ao tratamento de efluentes industriais provenientes de uma indústria de bebidas, com enfoque comparativo entre fontes de alimentação elétrica convencional e energia solar fotovoltaica. A pesquisa foi conduzida em escala laboratorial, utilizando reator eletrolítico de alumínio, sob planejamento fatorial 2³, com variáveis como pH, tempo de processo e espaçamento entre eletrodos. Indicadores de qualidade como DQO, turbidez e cor verdadeira foram analisados. Os resultados demonstraram remoção de até 98% de turbidez e cor, e 57% de DQO. O sistema fotovoltaico apresentou desempenho similar ao convencional, com vantagens econômicas e ambientais a longo prazo. Conclui-se que a EC, especialmente com fonte solar, é uma alternativa promissora para o tratamento de efluentes industriais, promovendo a sustentabilidade e melhoria do efluente tratado.

Palavras-Chave – Sustentabilidade, efluente industrial, Energia fotovoltaica

1) Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia – Mestranda na Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) - Campus I - Lot. Cidade Universitária, PB, 58051-900, (83) 99660-3695, mcrv@academico.ufpb.br;
2) Universidade Federal da Paraíba: Campus I - Lot. Cidade Universitária, PB, 58051-900, Ramal 7684/28;
3) Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia – Mestrando na Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) - Campus I - Lot. Cidade Universitária, PB, 58051-900, (83) 99660-3695, emanuel.gomes@academico.ufpb.br;

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por práticas sustentáveis no uso e tratamento da água, especialmente no setor industrial, impõe desafios à gestão de recursos hídricos. A indústria de bebidas destaca-se como uma das maiores consumidoras de água no Brasil, representando 5,4% da água retirada dos corpos hídricos, conforme dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2017). Essa atividade também é responsável pela geração de efluentes ricos em matéria orgânica, sólidos em suspensão e compostos químicos que, se não tratados adequadamente, podem comprometer a qualidade dos corpos receptores.

Nesse contexto, o uso de tecnologias eficazes e sustentáveis para o tratamento de efluentes industriais torna-se essencial. A eletrocoagulação (EC) é uma técnica de tratamento físico-químico que utiliza corrente elétrica para promover a remoção de poluentes presentes na água, sem a necessidade de reagentes químicos adicionais. Contudo, seu uso pode ser economicamente limitado devido ao consumo energético. A integração com fontes de energia renovável, como a fotovoltaica, surge como uma alternativa viável para mitigar esse desafio.

Este artigo visa avaliar a eficiência do processo de eletrocoagulação utilizando fontes de energia elétrica convencional e solar fotovoltaica no tratamento de efluente de indústria de bebidas, propondo uma alternativa ambientalmente sustentável e economicamente viável.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Coleta e caracterização das amostras

As amostras utilizadas foram provenientes de uma indústria de bebidas do estado de Pernambuco. A coleta foi realizada com auxílio técnico da Estação de Tratamento de Despejos Industriais (ETDI) local. Os parâmetros analisados incluíram: Demanda Química de Oxigênio (DQO), Turbidez e Cor verdadeira, conforme descrito na metodologia do *Standart Methods* (1992) (*American Public Health Association*, 1992) e caracterizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental (LABSAM - UFPB), conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização das amostras brutas utilizadas nos testes e planejamentos

Parâmetro	Data da coleta	
	Coleta 1 - 29/02/24	Coleta 2 - 17/05/24
Condutividade	1325	1406
Cor verdadeira	887,42	1657,184
DQO	4706,95	5366,47
pH inicial	6,45	5,79
Turbidez	-	768,7

Fonte: elaboração própria (2024).

Foram utilizados os seguintes equipamentos conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Principais parâmetros utilizado para analisar as amostras brutas e tratadas

Parâmetros de análise	Métodos utilizados
Turbidez	Nefelométrico (SM 2130 B)
DQO	Eletrométrico (SM ¹ 4500 H ⁺ B)
Cor verdadeira	Platino-cobalto

Fonte: elaboração própria (2024).

2.2. Reator de eletrocoagulação

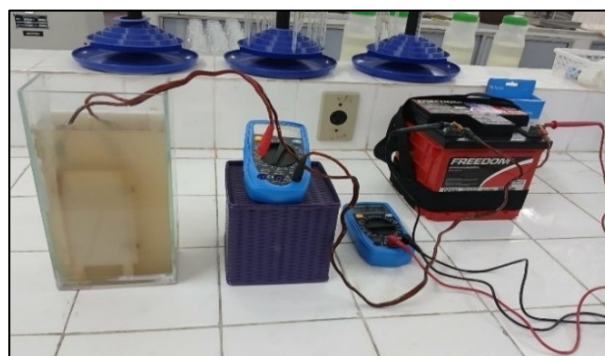
O reator utilizado foi confeccionado em vidro de dimensões $25,3 \times 12,3 \times 7,7$ cm, com eletrodos de alumínio de $13 \times 6,8 \times 4,5$ cm (ver Figura 1), dispostos verticalmente. Foram empregadas duas fontes de alimentação (Figuras 2-4): uma elétrica convencional (fonte CC) e uma solar fotovoltaica com placas, controlador de carga e bateria.

Figura 1 – Eletrodos de alumínio após serem utilizados nos testes



Fonte: acervo próprio (2024).

Figura 2 - Aplicação do sistema fotovoltaico para utilização da eletrocoagulação



Fonte: acervo próprio (2024).

Figura 3 - Aplicação do sistema convencional para utilização da eletrocoagulação



Fonte: acervo próprio (2024).

Figura 4 - Placas fotovoltaicas utilizadas nos testes



Fonte: acervo próprio (2024).

2.3. Planejamento experimental

Foi adotado um planejamento fatorial 2^3 , variando-se as seguintes variáveis: pH (6,5; 7,5; 8,5), espaçamento entre eletrodos (0,5 cm; 1,0 cm; 1,5 cm) e tempo de tratamento (10 a 30 minutos), conforme a Tabela 2. Os experimentos foram conduzidos em duplicata e avaliados os efeitos principais e interações utilizando gráficos de Pareto com significância de 95%.

Tabela 2 – Matriz resultante do planejamento fatorial 2³

Experimento	Fator A	Fator B	Fator C	Tipo
1	-1	-1	-1	Fatorial
2	+1	-1	-1	Fatorial
3	-1	+1	-1	Fatorial
4	+1	+1	-1	Fatorial
5	-1	-1	+1	Fatorial
6	+1	-1	+1	Fatorial
7	-1	+1	+1	Fatorial
8	+1	+1	+1	Fatorial
9	0	0	0	Ponto central
10	0	0	0	Ponto central
11	0	0	0	Ponto central

Fonte: elaboração própria (2024).

2.4. Análise de eficiência

A eficiência foi calculada com base nos percentuais de remoção de DQO, turbidez e cor verdadeira. Para isso, foi aplicada a Equação 1 para calcular a eficiência:

$$\text{Eficiência(\%)} = \left[\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right] * 100 \quad (1)$$

Em que: C_0 é a concentração inicial do parâmetro e C_e é a concentração final do parâmetro após o tratamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização das amostras

As amostras brutas da ETDI apresentaram instabilidade nos parâmetros analisados, dificultando a obtenção de características uniformes para o efluente. Essa variabilidade é atribuída aos fatores operacionais e à natureza dinâmica do processo industrial. As Tabelas 3 e 4 mostram o resumo dos resultados dos parâmetros avaliados (Cor verdadeira, DQO, pH inicial e Turbidez), com base nas amostras coletadas no período de 29/02/2024 a 17/05/2024, sob diferentes condições experimentais, elas correspondem as caracterizações do efluente pós-tratamento.

Tabela 3 – Resultados das amostras pós-tratamento (coleta 1) no Planejamento Fatorial 1

Experimento	Resultados			
	DQO	Turbidez	Cor Verdadeira	pH final
1-1	7760,49	985,67	156,26	7,20
1-2	8303,18	269,33	399,34	7,07
1-3	7206,95	118,00	17,26	9,32
1-4	7326,34	269,33	129,25	7,40
1-5	7753,26	393,00	121,54	7,15
1-6	7901,59	392,00	106,10	7,15
1-7	8592,62	378,67	217,99	7,18
1-8	2007,96	51,00	28,93	6,71
1-9	3939,94	930,67	121,54	6,68
1-10	3147,61	27,00	21,22	6,64
1-11	2159,91	53,67	52,08	6,66

Fonte: elaboração própria (2024).

Tabela 4 – Resultados das amostras pós-tratamento (coleta 2) no Planejamento Fatorial 3

Experimento	Resultados			
	DQO	Turbidez	Cor Verdadeira	pH final
3-1	4996,37	468,70	283,59	6,61
3-2	4248,91	681,30	268,16	7,75
3-3	3515,97	117,00	52,09	6,48
3-4	4466,62	436,70	248,87	6,70
3-5	4023,95	406,70	90,67	5,71
3-6	4495,65	388,70	777,47	5,80
3-7	4568,21	279,30	102,55	5,53
3-8	3385,34	165,70	453,36	6,47
3-9	4161,83	820,30	515,10	5,87
3-10	4176,34	18,40	94,53	6,35
3-11	4103,77	47,70	480,37	6,40

Fonte: elaboração própria (2024).

3.2. Eficiência de remoção

Os resultados demonstraram que o processo de eletrocoagulação apresentou alta eficiência na remoção dos principais parâmetros de tratamento de efluente. A remoção máxima de DQO alcançou 57%, enquanto os valores para turbidez e cor verdadeira atingiram até 98%, destacando o potencial da técnica para o tratamento de efluentes industriais de bebidas, conforme as Tabelas 5 e 6.

Tabelas de eficiência e gráficos

Tabela 5 – Eficiência na redução de poluentes (Planejamento Fatorial 1) com uso de fonte convencional

Experimento	Fatores			Eficiência de redução/remoção (em %)		
	A (Tempo)	B (Espaçamento)	C (pH)	DQO	Turbidez	Cor Verdadeira
1-1	20	1,5	8,5	0,00%	-	82,39%
1-2	10	1,5	8,5	0,00%	-	55,00%
1-3	20	0,5	8,5	0,00%	-	98,06%
1-4	10	0,5	8,5	0,00%	-	85,44%
1-5	15	1,0	7,5	0,00%	-	86,30%
1-6	15	1,0	7,5	0,00%	-	88,04%
1-7	15	1,0	7,5	0,00%	-	75,44%
1-8	20	1,5	6,5	57,34%	-	96,74%
1-9	10	1,5	6,5	16,30%	-	86,30%
1-10	20	0,5	6,5	33,13%	-	97,61%
1-11	10	0,5	6,5	54,11%	-	94,13%

Fonte: elaboração própria (2024).

Tabela 6 - Eficiência na redução de poluentes (Planejamento Fatorial 2) com uso de fonte fotovoltaica

Experimento	Fatores			Eficiência de redução/remoção (em %)		
	A (Tempo)	B (Espaçamento)	C (pH)	DQO	Turbidez	Cor Verdadeira
2-1	20	1,5	8,5	6,90%	39,03%	82,89%
2-2	10	1,5	8,5	20,82%	11,37%	83,82%
2-3	20	0,5	8,5	34,48%	84,78%	96,86%
2-4	10	0,5	8,5	16,77%	43,19%	84,98%
2-5	15	1,0	7,5	25,02%	47,09%	94,53%
2-6	15	1,0	7,5	16,23%	49,43%	53,09%
2-7	15	1,0	7,5	14,87%	63,67%	93,81%
2-8	20	1,5	6,5	36,92%	78,44%	72,64%
2-9	10	1,5	6,5	22,45%	0,00%	68,92%
2-10	20	0,5	6,5	22,18%	97,61%	94,30%

Experimento	Fatores			Eficiência de redução/remoção (em %)		
	A (Tempo)	B (Espaçamento)	C (pH)	DQO	Turbidez	Cor Verdadeira
2-11	10	0,5	6,5	23,53%	93,79%	71,01%

Fonte: elaboração própria (2024).

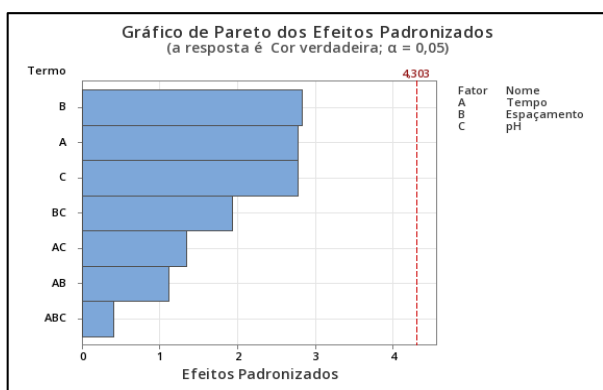
3.3. Influência dos parâmetros operacionais

Os gráficos de Pareto mostraram que o tempo de tratamento e o espaçamento entre eletrodos foram os fatores mais significativos para a remoção de parâmetros. O pH também influenciou, principalmente na formação de hidróxidos metálicos essenciais para a coagulação. O melhor desempenho foi obtido em relação a eficiência de remoção de DQO foi a configuração pH de 6,5; espaçamento de 1,5 cm e 20 minutos de tempo de processo, mais especificamente os testes 1-8 e 2-8, entretanto ao modificar o espaçamento com as demais configurações, a redução em relação a Cor verdadeira e Turbidez foram melhores, os testes 1-10 e 2-10.

- Cor verdadeira

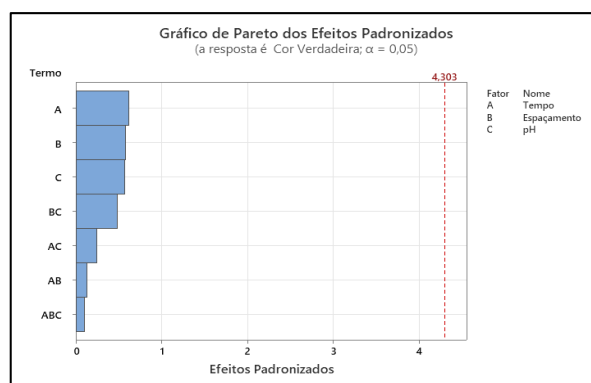
Em relação ao Planejamento Fatorial 1 (Figura 5), a eficiência de remoção variou de 55,00% a 98,06% para a Cor verdadeira. O teste 1-3 se destacou com 98,06% de remoção, mas, de acordo com os fatores analisados pelo Gráfico de Pareto, não foi possível determinar qual deles exerce maior influência na redução da Cor verdadeira, uma vez que o gráfico sinalizou que nenhum dos parâmetros estudados foram significantes para a obtenção do resultado. No Planejamento Fatorial 2 (Figura 6), as remoções variaram de 53,09% a 96,86%, com o teste 2-3 alcançando 96,86% de remoção, mas de igual modo nenhum dos fatores analisados exerceram influência significativa.

Figura 5 - Relação de Fatores com a Cor Verdadeira (Planejamento Fatorial 1)



Fonte: elaboração própria (2024).

Figura 6 - Relação de Fatores com a Cor Verdadeira (Planejamento Fatorial 2)



Fonte: elaboração própria (2024).

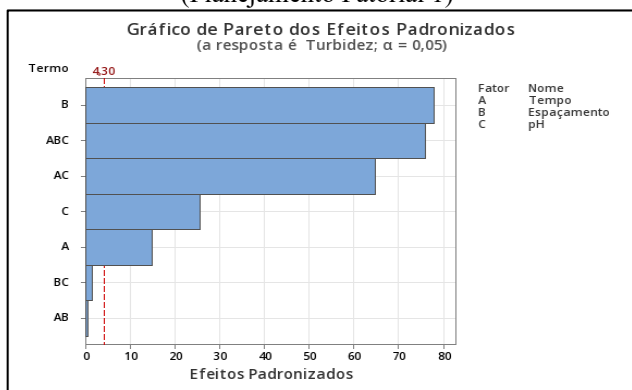
- Turbidez

De acordo com o Planejamento Fatorial 1 (Figura 7), o fator primário foi o espaçamento com maior nível de significância pelo Gráfico de Pareto, pois quanto menor o espaçamento, maior é o campo elétrico, a velocidade de reação e a dispersão do coagulante, aumentando a eficácia do processo. Além disso, os três fatores em conjunto também apresentaram uma influência significativa.

No Planejamento Fatorial 2 (Figura 8), o espaçamento entre eletrodos foi identificado como o fator mais relevante para a obtenção dos dados de Turbidez. No entanto, diferente do planejamento 1, o 2 teve como fator relevante secundário a pH e não o conjunto dos três fatores, retomando a

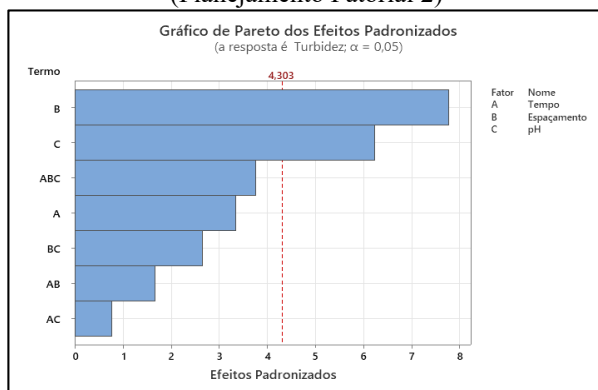
suscetibilidade da eficiência do processo em relação as condições necessárias para a liberação de coagulante e formação de flocos dependentes do pH.

Figura 7 - Relação de Fatores com a Turbidez (Planejamento Fatorial 1)



Fonte: elaboração própria (2024).

Figura 8 - Relação de Fatores com a Turbidez (Planejamento Fatorial 2)



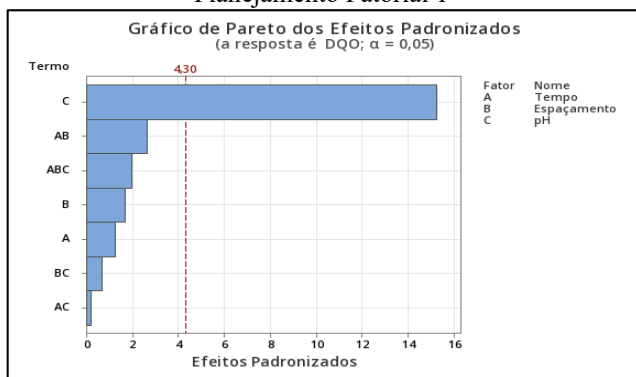
Fonte: elaboração própria (2024).

- DQO

Ao analisar os fatores mais influentes no processo do Planejamento Fatorial 1 (Figura 9), observou-se que o pH da amostra é um fator que apresenta uma alta sensibilidade para os resultados. Os demais fatores não alcançaram a linha de significância.

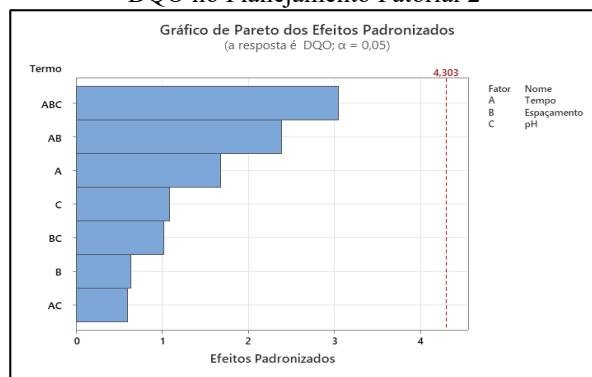
Por outro lado, no Planejamento Fatorial 2, observou-se que nenhum dos fatores utilizados foi determinante para a obtenção dos resultados, pois nenhum dos fatores alcançou o nível de significância, conforme a Figura 10.

Figura 9 - Resultado da relação de fatores com a DQO no Planejamento Fatorial 1



Fonte: elaboração própria (2024).

Figura 10 - Resultado da relação de fatores com a DQO no Planejamento Fatorial 2



Fonte: elaboração própria (2024).

3.4. Comparação entre fontes de energia

O sistema alimentado por energia fotovoltaica demonstrou desempenho comparável ao sistema convencional, atingindo níveis semelhantes de remoção. Além disso, ao considerar as possíveis vantagens quanto à sustentabilidade ambiental e à redução de custos operacionais energéticos a longo prazo, pode-se considerar a opção fotovoltaica promissora do ponto de vista ambiental.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos reforçam a aplicabilidade da eletrocoagulação como método com potencial aplicação para o tratamento de efluentes industriais com elevada carga orgânica e sólidos em suspensão, porém segundo este trabalho se tornando eficaz como tratamento preliminar/ Primário. A elevada eficiência de remoção da cor e turbidez está em consonância com estudos de Eyvaz *et al.* (2014) e Mollah *et al.* (2004), que destacam a eficiência da técnica para remoção de poluentes diversos sem a adição de produtos químicos.

O uso de energia solar representa uma inovação importante no contexto da sustentabilidade. Conforme Masoumian e Kopacek (2015), a integração de painéis fotovoltaicos a sistemas de tratamento permite sua aplicação em áreas isoladas ou com alto custo de energia.

Embora o processo apresente limitações, como o desgaste dos eletrodos e a necessidade de substituições periódicas, os benefícios em termos de desempenho ambiental, simplicidade operacional e custo-benefício são relevantes. A replicação deste estudo em outras indústrias de base hídrica pode contribuir para políticas de segurança hídrica e economia circular.

AGRADECIMENTOS –

Os autores agradecem ao Laboratório de Saneamento Ambiental (LABSAM–UFPB) pela disponibilização de instrumentação e pelo suporte da equipe técnica; à PROPESQ–UFPB pelo financiamento da pesquisa por meio da bolsa PIVIC (Edital 2023–2024) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECAM-UFPB pelo incentivo à produção científica; e à indústria de bebidas parceira pelo fornecimento do efluente empregado neste estudo.

REFERÊNCIAS

- ANA – Agência Nacional de Águas. (2017). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Brasília: ANA.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18. ed. Washington, DC: APHA-AWWA-WEF, 1992.
- Eyvaz, M., Yildiz, Y. S., Aktas, M., & Koparal, A. S. (2014). Electrochemical treatment of industrial effluent: A review. *Water Science & Technology*, 69(1), 33–42.
- Masoumian, M., & Kopacek, P. (2015). Integration of photovoltaic power to EC systems. *Renewable Energy Journal*, 76, 478–484.
- Mollah, M. Y. A., Morkovsky, P., Gomes, J. A. G., Kesmez, M., Parga, J., & Cocke, D. L. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 114(1–3), 199–210.