International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

Determinação das condições ótimas de tratamento de efluentes têxteis por meio de processos de oxidação avançada

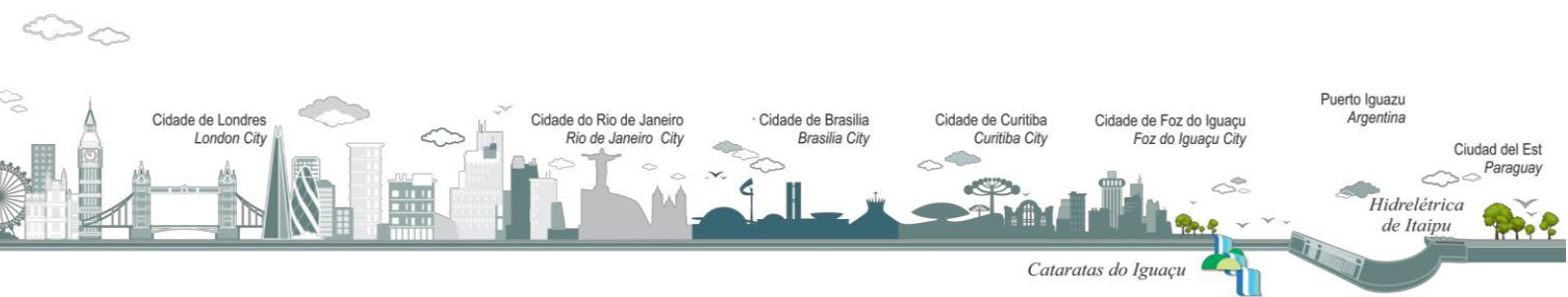
Determination of optimal treatment conditions for textile effluents through advanced oxidation processes

Ivan Marcelo Mariño Choque[1]
Sdenka Milena Alandia Ramírez[2]
Camilo Freddy Mendoza Morejón[3]

Resumo: A indústria têxtil gera grandes volumes de efluentes caracterizados por uma alta carga orgânica devido ao uso de corantes e surfactantes em seus processos produtivos. Esses poluentes apresentam baixa biodegradabilidade e representam um risco para o meio ambiente e a saúde pública. Os processos de oxidação avançada são uma alternativa eficiente para o tratamento desses efluentes; entretanto, é necessário encontrar condições que otimizem a eficácia do processo. Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi determinar as condições ótimas de tratamento utilizando o método de fotocatálise heterogênea (H_2O_2/UV/TiO_2). O estudo aplicou a metodologia de superfície de resposta com um planejamento experimental Box-Behnken, que resultou em um modelo validado experimentalmente. As variáveis operacionais estudadas foram pH, concentração de H_2O_2 e concentração de TiO_2. O parâmetro avaliado para determinar a eficácia do processo foi a Demanda Química de Oxigênio (DQO). Os testes experimentais foram realizados em um sistema de tratamento composto por um reator em batelada com agitação e uma lâmpada UV. Os resultados demonstraram a existência de condições ótimas que maximizam a eficiência do processo, nomeadamente: pH de 6,13; concentração de H_2O_2 de 2388 ppm; e concentração de TiO_2 de 491 ppm. A percentagem de remoção de carga orgânica alcançada nestas condições foi de 67,07%, considerada satisfatória. Assim, este estudo fornece uma base sólida para a aplicação desta tecnologia no tratamento de efluentes têxteis, com potencial para escalonamento industrial.

Palavras-Chave: Carga orgânica; Eficiência; Delineamento experimental; Remoção.

[1] Universidade Técnica de Oruro – Bolívia. E-mail: marinoivanmarce01@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1093-6397
[2] Universidade Técnica de Oruro - Bolívia . E -mail: sdenka.alandia@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3290-0664
[3] Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Brasil. E-mail: camilo_freddy@hotmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4071-0504



International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

Abstract: The textile industry generates large volumes of effluent characterized by a high organic load due to the use of dyes and surfactants in its production processes. These pollutants exhibit low biodegradability and pose a risk to the environment and public health. Advanced oxidation processes are an efficient alternative for treating these effluents; however, it is necessary to find conditions that optimize process effectiveness. In this context, the objective of this research was to determine the optimal treatment conditions using the heterogeneous photocatalysis method (H_2O_2/UV/TiO_2). The study applied response surface methodology with a Box-Behnken experimental design, which yielded a model that was experimentally validated. The operational variables studied were pH, H_2O_2 concentration, and TiO_2 concentration. The parameter evaluated to determine process effectiveness is the Chemical Oxygen Demand (COD). The experimental tests were carried out in a treatment system consisting of a batch reactor with agitation and a UV lamp. The results demonstrated the existence of optimal conditions that maximize the process's efficiency, namely: a pH of 6.13; an H_2O_2 concentration of 2388 ppm; and a TiO_2 concentration of 491 ppm. The organic load removal percentage achieved under these conditions was 67.07%, which was considered satisfactory. Thus, this study provides a solid foundation for the application of this technology in the treatment of textile effluents, with potential for industrial scaling.

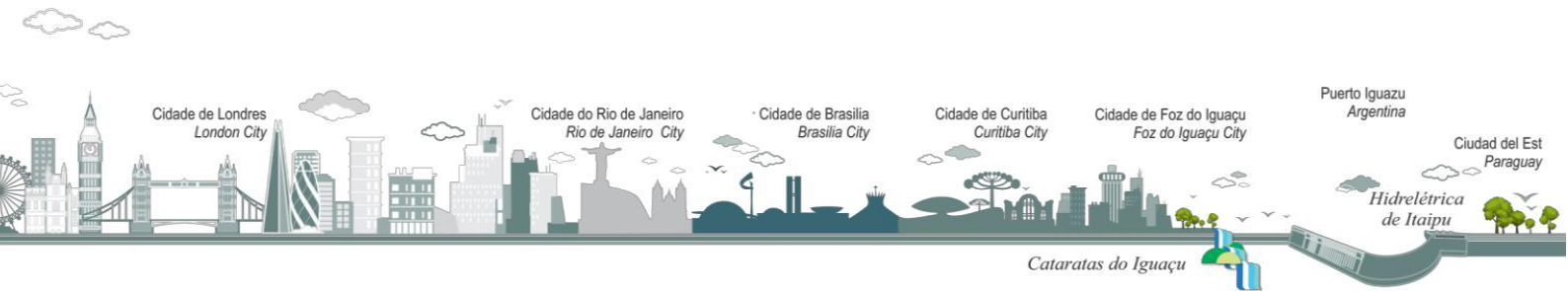
Key Words: Organic load; Efficiency; Experimental design; Removal.

INTRODUÇÃO

A indústria têxtil abrange diversos processos de produção, desde a obtenção de matérias-primas (fibras naturais ou sintéticas) até a fabricação de produtos intermediários (fios, tecidos) e a obtenção de peças de vestuário acabadas. Em cada etapa, os materiais têxteis passam por uma série de tratamentos que envolvem insumos químicos como corantes, surfactantes, detergentes e sais. A água é o meio de aplicação usual e, por fim, é descartada como efluente final.

O efluente têxtil resultante contém contaminantes de natureza diversa e apresenta as seguintes características: grande quantidade de sólidos suspensos e dissolvidos; coloração intensa; pH altamente alcalino; altos valores de demanda química de oxigênio (DQO) e de demanda bioquímica de oxigênio (DBO); e baixa relação DBO/DQO, indicando uma alta proporção de contaminantes não biodegradáveis.

A presença desses contaminantes representa um risco para o meio ambiente e para a saúde pública. Portanto, é essencial implementar sistemas de tratamento eficazes que eliminem ou reduzam os contaminantes presentes nos efluentes têxteis antes do descarte na rede de esgoto, em conformidade com as normas ambientais. De modo geral, os processos de oxidação avançada são apresentados como uma alternativa viável para o tratamento desses efluentes, devido à sua



capacidade de degradar contaminantes pouco biodegradáveis (como corantes e surfactantes).

Neste contexto, a pesquisa teve como objetivo determinar as condições ótimas de tratamento de efluentes têxteis por meio do processo de oxidação avançada ($H_2O_2/TiO_2/UV$), visando maximizar a eficiência do processo. Isso foi alcançado por meio da aplicação da metodologia de superfície de resposta com um planejamento experimental multivariável.

O problema de pesquisa deste estudo é formulado da seguinte forma: Quais são as condições operacionais ótimas para o processo $H_2O_2/TiO_2/UV$ que maximizem a eficiência na remoção da matéria orgânica presente em efluentes têxteis?

A importância desta pesquisa reside em sua contribuição ao desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para o tratamento de efluentes industriais, ao fornecer conhecimento experimental e prático para aplicação em contextos reais. Além disso, os resultados obtidos podem contribuir para futuras pesquisas focadas na escalabilidade industrial e na integração a sistemas de tratamento combinados.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os Processos de Oxidação Avançada (POAs) são uma alternativa para o tratamento de efluentes têxteis com contaminantes orgânicos tóxicos (corantes e surfactantes) e baixa biodegradabilidade. Foi demonstrado que são um método adequado com grande potencial para desenvolvimento a curto prazo (Kim e Vogelpohl, 2004). Esses processos envolvem oxidação química à pressão e temperatura ambientes, alcançando a mineralização completa dos contaminantes. O agente oxidante mais comumente usado é o radical hidroxila (•OH), que tem um alto potencial redox (E°) de 2,8 V, não é seletivo e tem tempos de reação curtos (Almecija et al., 2010). Existem diferentes métodos para a produção de radicais hidroxila, e a seleção do mais adequado (H_2O_2, O_3) depende das necessidades específicas de cada efluente têxtil. Entre os métodos mais desenvolvidos e pesquisados estão o método do peróxido de hidrogênio e radiação ultravioleta (H_2O_2/UV) e o método conhecido como fotocatálise heterogênea ($H_2O_2/UV/TiO_2$) (López, 2001).

A fotocatálise com TiO_2, como semicondutor, utilizando radiação UV, tanto solar quanto artificial, tornou-se uma das técnicas mais eficazes para a remoção de contaminantes de águas residuais, devido ao seu grande efeito na degradação de contaminantes pouco biodegradáveis

(Irigoyen et al., 2014). Além disso, quando se utiliza a radiação UV solar natural, ela não gera um custo energético elevado ou considerável, tornando-se uma das fontes de energia mais limpas e ecológicas.

No processo de fotocatálise heterogênea (H_2O_2/UV/TiO_2), a eficiência do processo depende das variáveis operacionais: concentração de peróxido de hidrogênio, concentração do fotocatalisador, magnitude do pH, concentração inicial do corante, intensidade da radiação UV e tempo de residência, uma vez que são estas que causam os maiores efeitos nos efluentes têxteis, pois reduzem tanto a coloração quanto a degradação de compostos orgânicos (Zaruma, et al., 2018). No entanto, a interação entre essas variáveis pode afetar significativamente a eficácia do tratamento. Nesse sentido, a aplicação de ferramentas de planejamento experimental e otimização torna-se fundamental para identificar as condições operacionais ótimas do processo de oxidação avançada.

Em um estudo conduzido por Álvarez e Palomino (2024), determinou-se que o processo de oxidação avançada (H_2O_2/UV/TiO_2) apresenta alta eficiência na remoção de matéria orgânica (degradação) em soluções sintéticas com o corante Preto Reativo (RB-5) com concentração inicial de 100 ppm, atingindo um percentual de descoloração de 95,66%, obtido por meio de uma análise de otimização, na qual as variáveis operacionais estudadas foram: pH, concentração de H_2O_2 e tempo de residência. As condições ótimas foram: pH 4; [H_2O_2] 1050 ppm; e 60 min. Além disso, constatou-se que o aumento da concentração de peróxido de hidrogênio melhora a degradação, embora haja um valor máximo, pois o peróxido de hidrogênio atua como sequestrador de radicais (•OH) e reduz a eficiência do processo.

METODOLOGIA

A metodologia empregada neste estudo compreendeu cinco etapas: 1) Obtenção e caracterização do efluente têxtil; 2) Descrição do processo de oxidação avançada; 3) Medição dos parâmetros operacionais; 4) Aplicação do planejamento experimental; e 5) Análise estatística com respectiva avaliação. As etapas são detalhadas abaixo:

Cidade de Londres London City
Cidade do Rio de Janeiro Rio de Janeiro City
Cidade de Brasília Brasilia City
Cidade de Curitiba Curitiba City
Cidade de Foz do Iguaçu Foz do Iguaçu City
Puerto Iguazu Argentina
Ciudad del Est Paraguay
Hidrelétrica de Itaipu
Cataratas do Iguaçu

International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

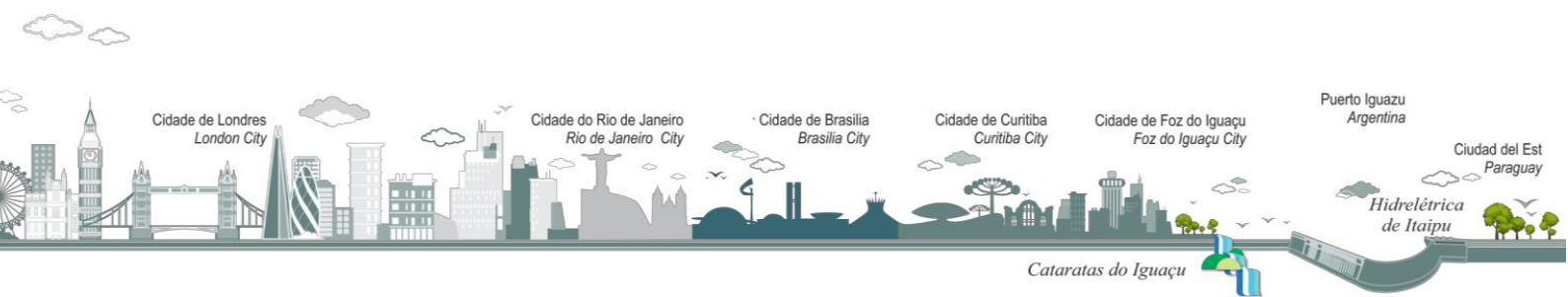
Descrição do Efluente Têxtil

O efluente têxtil sintético foi obtido no Laboratório de Água e Meio Ambiente do curso de Engenharia Química. O processo de tingimento foi aplicado a uma fibra de algodão, utilizando exaustão descontínua com o corante Preto Reativo 5 (BR-5), de acordo com a curva de tingimento fornecida pelo fabricante; um detergente aniônico comercial também foi utilizado na lavagem.

Para a caracterização do efluente têxtil, foram considerados parâmetros operacionais puramente físico-químicos, como pH, DQO e cor, devido à sua origem industrial. Esses parâmetros foram medidos no mesmo laboratório.

Processo de Oxidação Avançada (POA)

O sistema de tratamento utilizado no POA (H_2O_2/UV/TiO_2) consistia em um fotorreator em batelada, uma lâmpada ultravioleta de mercúrio de baixa pressão (6 W, UV-C, λ = 254 nm) e um agitador magnético (Figura 1). A geometria do fotorreator era um cilindro coaxial vertical, com a lâmpada posicionada no eixo axial e a radiação emitida radialmente, garantindo distribuição uniforme e otimizando a irradiância, que é a quantidade de radiação transmitida por unidade de área do efluente a ser tratado. A capacidade de tratamento do fotorreator era de 1 litro e suas dimensões eram de 10,8 cm de diâmetro externo e 20,0 cm de altura. Os materiais utilizados para sua construção foram vidro de Quartzo (cilindro interno) e vidro Duran (cilindro externo), selecionados com base em sua transmissividade, que é a capacidade de transmitir radiação em comprimentos de onda curtos.



International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

Figura 1 - Sistema de tratamento POA

Fonte: Resultados da pesquisa.

Para determinar a eficiência do método (H_2O_2/UV/TiO_2) na redução da carga orgânica do efluente têxtil em condições operacionais ótimas, a porcentagem de remoção foi calculada pela equação 1, em que DQO_o é a Demanda Química de Oxigênio inicial em [mgO_2/L] e DQO_f é a Demanda Química de Oxigênio final em [mgO_2/L].

$$\%Remoção = \frac{DQO_o - DQO_f}{DQO_o} * 100\% \quad (1)$$

Medição de parâmetros

A medição dos parâmetros físico-químicos foi realizada no laboratório de Água e Meio Ambiente do programa de Engenharia Química. Para a DQO, utilizou-se um fotômetro (Levibond MD 600) e frascos de 16 mm preparados com reagentes oxidantes, aplicando-se o método padrão estabelecido pela norma ASTM D1252. A cor foi medida com um colorímetro (LaMotte Smart2) de acordo com a norma (STDM, 2120).

Delineamento Experimental

De acordo com o objetivo da pesquisa, as condições operacionais ótimas foram determinadas por meio da metodologia de superfície de resposta (MSR). O delineamento

Cidade de Londres London City
Cidade do Rio de Janeiro Rio de Janeiro City
Cidade de Brasília Brasilia City
Cidade de Curitiba Curitiba City
Cidade de Foz do Iguaçu Foz do Iguaçu City
Puerto Iguazu Argentina
Ciudad del Est Paraguay
Hidrelétrica de Itaipu
Cataratas do Iguaçu

experimental empregado foi o de Box-Behnken. Três variáveis operacionais (fatores) foram estudadas, cada uma com dois níveis (regiões experimentais), conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Fatores e níveis do planejamento experimental

Fatores	Nível inferior	Nível superior
(A) pH	4	10
(B) Concentração H_2O_2	1500 ppm	3000 ppm
(C) Concentração TiO_2	300 ppm	700 ppm

Fonte: Resultados da pesquisa.

O planejamento experimental compreendeu 15 testes, realizados sob condições específicas definidas pelo projeto desenvolvido no software Design-Expert 13.

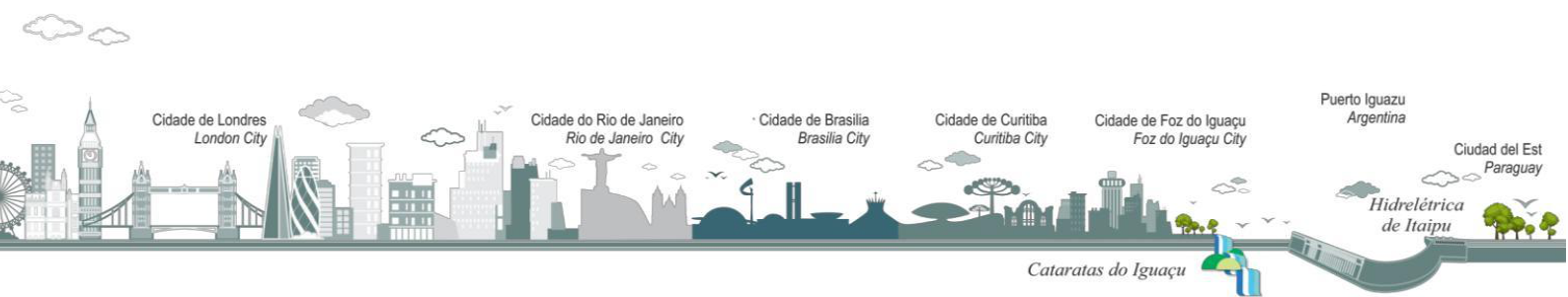
Os testes experimentais foram realizados no sistema de tratamento previamente descrito. Em todos os casos, utilizou-se uma amostra de 1 litro de efluente têxtil, com velocidade de agitação de 300 rpm, temperatura ambiente de aproximadamente 17 °C e tempo de residência de 180 minutos. O pH de cada teste foi ajustado pela adição de soluções de HCl e NaOH 1,0 N. Os reagentes utilizados foram peróxido de hidrogênio (H_2O_2) como agente oxidante (pureza de 50%) e dióxido de titânio (TiO_2) do tipo anatase (pureza de 98%) como fotocatalisador.

Nos testes realizados, a amostra de efluente têxtil foi vertida no sistema de tratamento, o pH foi ajustado e as quantidades necessárias de H_2O_2 e TiO_2 foram adicionadas, de acordo com o plano experimental. Para avaliar a remoção da matéria orgânica, os parâmetros demanda química de oxigênio (DQO) e cor foram monitorados após a separação do TiO_2 por filtração.

Devido à presença de peróxido de hidrogênio residual no efluente tratado, os valores de DQO obtidos foram elevados, o que caracteriza "falsos positivos". Foi necessário corrigir esses valores utilizando uma curva de correção, na qual a concentração residual de H_2O_2 (g/L) de cada teste foi determinada por titulação redox (volumétrica), aplicando a equação 2, com uma solução padronizada de permanganato de potássio ($KMnO_4$) 0,1 N.

$$\left[\frac{g}{L}\right]_{H2O2} = \frac{C_{KMnO4} * V_{KMnO4}}{V_{H2O2}} * Eq_{H2O2} \quad (2)$$

A curva de correção foi determinada por regressão de dados experimentais, obtidos por meio da estimativa do valor de DQO, contribuído apenas pelo H_2O_2 residual.



International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

A correção da DQO foi realizada aplicando a equação 3, em que DQO_o é a Demanda Química de Oxigênio inicial em [mgO_2/L] e DQO_{H2O2} é a Demanda Química de Oxigênio fornecida apenas por H_2O_2 em [mgO_2/L].

$$DQO_{corrigido} = DQO_o - DQO_{H2O2} \quad (3)$$

Análise Estatística

Os dados experimentais obtidos foram processados no software Design-Expert 13, que construiu um modelo matemático de segunda ordem (quadrático) relacionando as variáveis independentes à variável dependente e às suas interações. A análise de variância (ANOVA) determinou a significância do modelo e de cada um de seus termos com um nível de confiança de 95%. A superfície de resposta e o gráfico de contorno permitiram identificar uma zona ótima para o processo de oxidação avançada, determinada numericamente no software Design-Expert 13 para um valor mínimo de DQO. Finalmente, o modelo foi validado experimentalmente sob condições operacionais ideais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

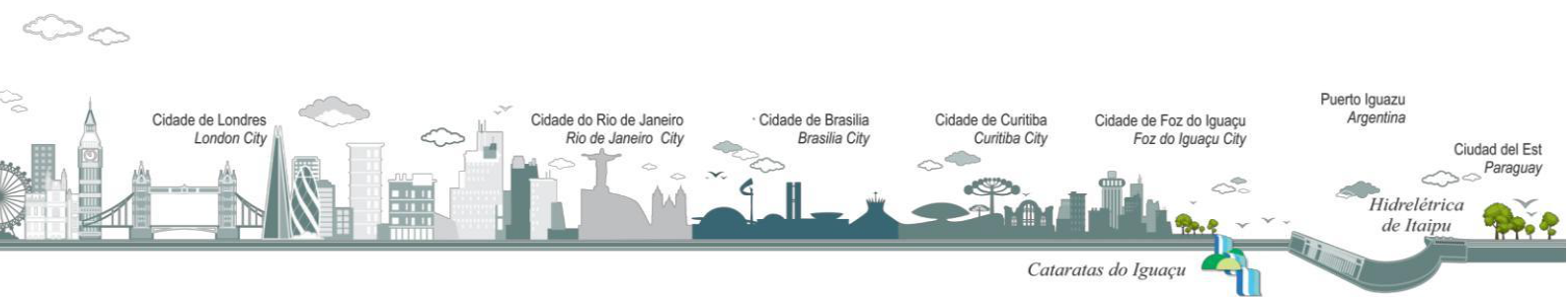
Os resultados da caracterização do efluente têxtil são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 **-** Caracterização físico-química do efluente têxtil

Identificação da amostra	**Parâmetros**		
	pH	**Cor** [PCU]	**DQO** [mgO_2/L]
M -1	9.85	4630	987

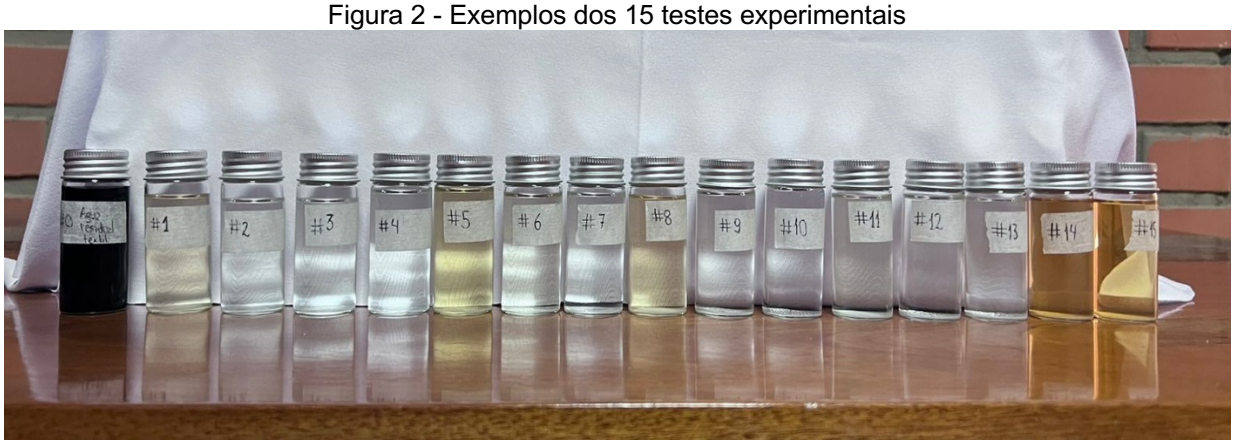
Fonte: Resultados da pesquisa.

De acordo com o planejamento experimental, a Figura 2 mostra os 15 testes realizados e os dados experimentais obtidos são apresentados na Tabela 3.



International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

Figura 2 - Exemplos dos 15 testes experimentais



Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 3 - Dados experimentais do planejamento Box-Behnken

Ordem estatística	Ordem de execução	pH	Concentração H_2O_2 (ppm)	Concentração TiO_2 (ppm)	DQO_o [mgO_2/L]	Cor [PCU]
4	1	10	3000	500	845	393
3	2	4	3000	500	1625	107
7	3	4	2250	700	1417	143
12	4	7	3000	700	1700	53
1	5	4	1500	500	1130	442
11	6	7	1500	700	1127	208
10	7	7	3000	300	1537	38
8	8	10	2250	700	942	520
14	9	7	2250	500	1327	57
15	10	7	2250	500	1442	51
5	11	4	2250	300	1417	206
13	12	7	2250	500	1390	78
9	13	7	1500	300	1215	351
2	14	10	1500	500	1087	1375
6	15	10	2250	300	992	1192

Fonte: Resultados da pesquisa.

Os resultados dos testes experimentais mostraram que os valores de DQO foram elevados em relação ao valor inicial (987 mg/L), o que se atribuiu à interferência do peróxido de hidrogênio residual na análise.

O método padrão para medição de DQO envolve a oxidação de compostos orgânicos na presença de dicromato ($Cr_2O_7^{2-}$) em condições ácidas. No entanto, o H_2O_2 não consumido durante

Cidade de Londres London City
Cidade do Rio de Janeiro Rio de Janeiro City
Cidade de Brasília Brasilia City
Cidade de Curitiba Curitiba City
Cidade de Foz do Iguaçu Foz do Iguaçu City
Puerto Iguazu Argentina
Ciudad del Est Paraguay
Hidrelétrica de Itaipu
Cataratas do Iguaçu

International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

a reação também é oxidado nesse meio, gerando uma leitura de DQO falsamente alta. Portanto, os valores de DQO foram corrigidos por meio de uma curva de calibração entre a concentração de H_2O_2 e a DQO equivalente. Os dados são apresentados na Tabela 4.

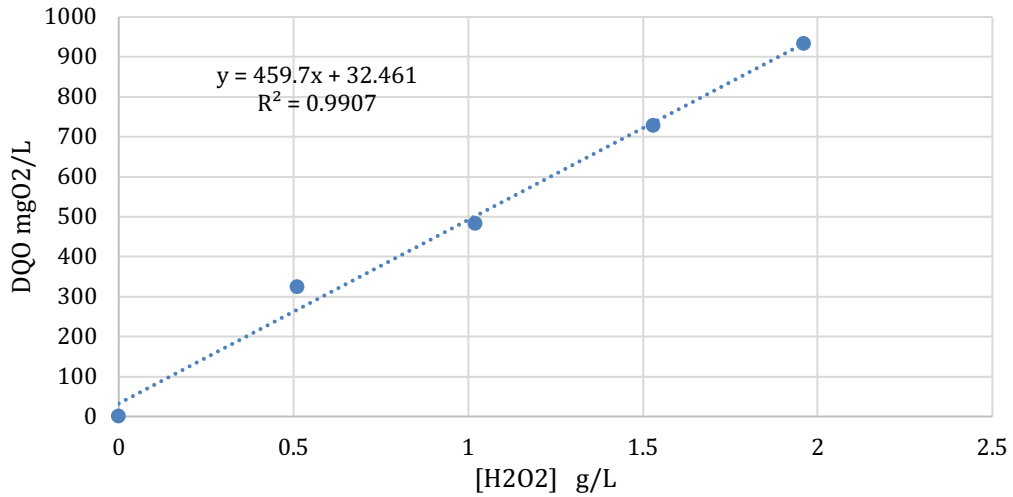
Tabela 4 - Dados da curva de calibração para a concentração de H_2O_2 com DQO equivalente

Concentração H_2O_2 [g/L]	DQO [mgO_2/L]
0	0
0.51	325
1.02	483
1.53	728
1.96	934

Fonte: Resultados da pesquisa.

Os dados se ajustam a uma função linear, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Curva de correção de DQO



Fonte: Resultados da pesquisa.

A curva de correção obtida a partir da regressão, com um coeficiente de correlação (R^2) de 0,9907, é representada pela equação 4.

$$[DQO]_{H2O2} = 459.7 * \left[\frac{g}{L}\right]_{H2O2} + 32.461 \quad (4)$$

Cidade de Londres London City
Cidade do Rio de Janeiro Rio de Janeiro City
Cidade de Brasília Brasilia City
Cidade de Curitiba Curitiba City
Cidade de Foz do Iguaçu Foz do Iguaçu City
Puerto Iguazu Argentina
Ciudad del Est Paraguay
Hidrelétrica de Itaipu
Cataratas do Iguaçu

International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

Os dados de concentração residual de H_2O_2 para cada teste são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados para a determinação de H_2O_2 residual

Teste nº.	V_{KMnO4} [ml]		C_{H2O2} [g/L]
1	0.3	0.4	0.39
2	2.6	2.6	2.52
3	1.8	2.0	1.94
4	2.2	2.3	2.33
5	1.3	1.4	1.36
6	1.4	1.4	1.36
7	2.5	2.4	2.42
8	0.4	0.4	0.39
9	2.2	2.2	2.13
10	2.4	2.3	2.33
11	2.0	2.0	1.94
12	2.2	2.2	2.13
13	1.1	1.2	1.16
14	0.4	0.4	0.39
15	0.4	0.4	0.39

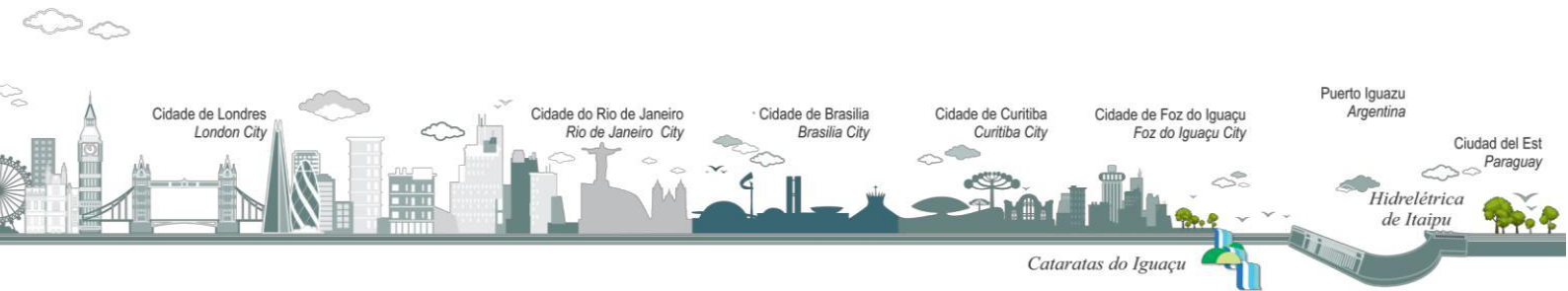
Fonte: Resultados da pesquisa.

Os dados experimentais corrigidos, processados pelo software, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados experimentais do planejamento Box-Behnken corrigidos para DQO

Ordem estatística	Ordem de execução	pH	Concentração H_2O_2 (ppm)	Concentração TiO_2 (ppm)	DQO_o [mgO_2/L]
4	1	10	3000	500	634
3	2	4	3000	500	434
7	3	4	2250	700	494
12	4	7	3000	700	598
1	5	4	1500	500	474
11	6	7	1500	700	471
10	7	7	3000	300	391
8	8	10	2250	700	731
14	9	7	2250	500	315
15	10	7	2250	500	340
5	11	4	2250	300	494
13	12	7	2250	500	378
9	13	7	1500	300	648
2	14	10	1500	500	876
6	15	10	2250	300	781

Fonte: Resultados da pesquisa.



International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

Com os valores de DQO corrigidos, observa-se uma redução desse parâmetro, o que está de acordo com estudos anteriores e se deve à oxidação da matéria orgânica até sua mineralização.

A Tabela 7 apresenta um resumo do ajuste do modelo para a variável DQO.

Tabela 7 - Resumo dos ajustes para o modelo

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R^2	Predicted R^2	
Linear	0.0732	0.0414	0.3067	0.1194	
2FI	0.5475	0.0356	0.2580	-0.0553	
Quadratic	**0.0006**	**0.4287**	**0.9542**	**0.8083**	**Suggested**
Cubic	0.4287		0.9643		Aliased

Fonte: Resultados da pesquisa utilizando o Design Expert 13, 2025.

O modelo quadrático mostrou-se o mais adequado, com p-value de 0,0006, R^2 ajustado de 0,9542 e R^2 previsto de 0,8083, indicando alta capacidade preditiva. A análise de falta de ajuste (Lack of Fit) indica um valor p de 0,4287, o que confirma que o modelo quadrático não apresenta falta de ajuste significativa. Portanto, este modelo foi sugerido e selecionado pelo software para a interpretação dos resultados.

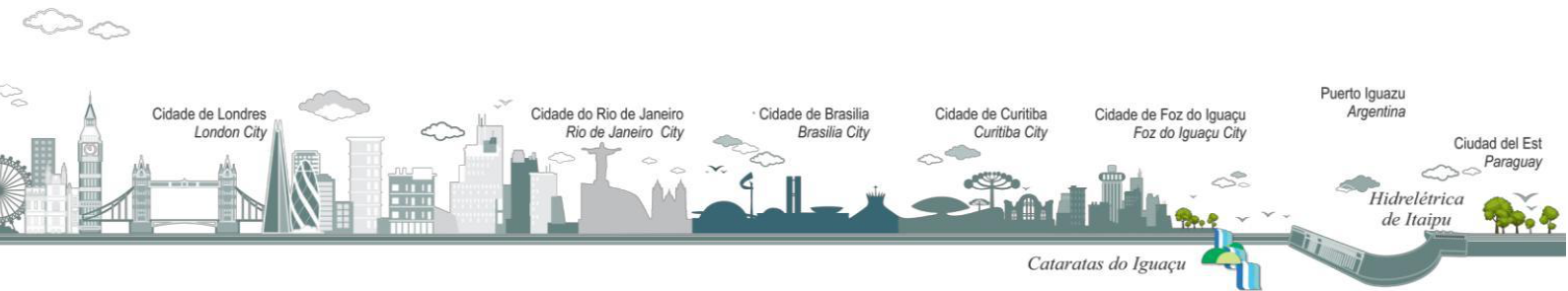
A análise de variância (ANOVA) do modelo quadrático é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 - ANOVA do Modelo de Segunda Ordem

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	3.884E+05	9	43155.97	33.40	0.0006	**significant**
A-pH	1.585E+05	1	1.585E+05	122.64	0.0001	
B-[H2O2]	21218.00	1	21218.00	16.42	0.0098	
C-[Catalizador]	50.00	1	50.00	0.0387	0.8518	
AB	10201.00	1	10201.00	7.89	0.0376	
AC	625.00	1	625.00	0.4837	0.5178	
BC	36864.00	1	36864.00	28.53	0.0031	
A^2	1.184E+05	1	1.184E+05	91.64	0.0002	
B^2	24275.10	1	24275.10	18.79	0.0075	
C^2	38101.56	1	38101.56	29.49	0.0029	
Residual	6461.17	5	1292.23			
Lack of Fit	4448.50	3	1482.83	1.47	0.4287	**not significant**
Pure Error	2012.67	2	1006.33			
Cor Total	3.949E+05	14				

Fonte: Resultados da pesquisa utilizando o Design Expert 13.

A ANOVA mostrou que o modelo proposto pelo software para descrever a redução da DQO pelo processo de oxidação avançada H_2O_2/UV/TiO_2 é estatisticamente significativo, com um valor



International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

F (F-value) de 33,40 e um valor p (p-value) de 0,0006 (Tabela 8). Isso indica que a regressão do modelo é significativa.

Os valores p menores que 0,0500 indicam que os termos do modelo são significativos. Neste caso, A, B, AB, BC, A², B² e C² são termos significativos do modelo. Os valores p maiores que 0,0500 indicam que os termos do modelo não são significativos; neste caso, C e AC. Finalmente, a análise de falta de ajuste apresentou um valor p de 0,4287, que não é significativo, indicando que o modelo de regressão analisado é adequado para representar a relação entre as variáveis.

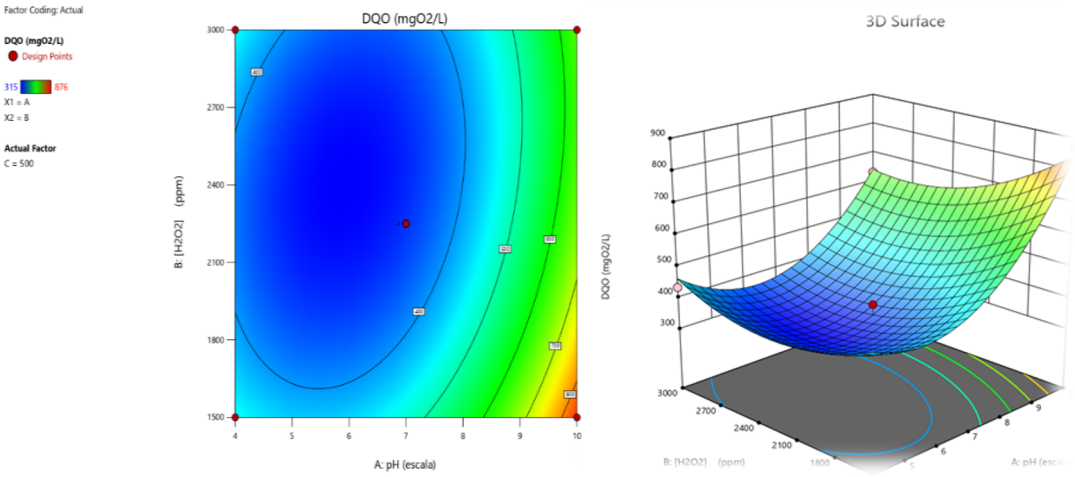
O modelo matemático determinado é expresso pela equação 5:

$$DQO = 344.33 + 140.75\,A - 51.50\,B - 2.50\,C - 50.50\,AB - 12.50\,AC + 96.00\,BC + 179.08\,A^2 + 81.08\,B^2 + 101.58\,C^2 \quad (5)$$

O modelo inclui termos lineares, interações entre fatores e termos quadráticos, refletindo a natureza não linear do processo. Os coeficientes indicam que o pH tem um efeito predominantemente positivo na resposta, enquanto a concentração de H_2O_2 e do catalisador têm efeitos menos significativos ou mesmo negativos em alguns termos de interação.

A Figura 4 ilustra o gráfico de contorno (formato bidimensional) e a superfície de resposta (formato tridimensional),

Figura 4 - Gráfico de contorno e superfície de resposta do Modelo de Segunda Ordem



Fonte: Resultados da pesquisa utilizando o Design Expert 13.

Cidade de Londres London City
Cidade do Rio de Janeiro Rio de Janeiro City
Cidade de Brasília Brasilia City
Cidade de Curitiba Curitiba City
Cidade de Foz do Iguaçu Foz do Iguaçu City
Puerto Iguazu Argentina
Ciudad del Est Paraguay
Hidrelétrica de Itaipu
Cataratas do Iguaçu

International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

A variável resposta é representada por um gradiente de cores, onde os valores mais baixos de DQO (melhor eficiência do processo) são mostrados em tons de azul e os valores mais altos (menor eficiência) em tons de verde a vermelho, conforme mostrado na Figura 4. Uma zona operacional ótima também é observada dentro da região experimental, localizada em valores de pH próximos a 6 – 6,5 com concentrações de H_2O_2 em torno de 2400 – 2600 ppm, onde um valor mínimo de DQO de aproximadamente 300 mg O_2/L é atingido.

Os resultados numéricos da análise de otimização são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Determinação das condições ótimas de operação.

Number	pH	[H_2O_2]	[Catalizador]	DQO [mgO_2/L]	Desirability	
1	**6.13**	**2388 ppm**	**491 ppm**	**313**	**1.000**	**Selected**
2	5.83	2408 ppm	498 ppm	314	0.998	
3	6.30	2491 ppm	459 ppm	315	0.997	

Fonte: Resultados da pesquisa utilizando o Design Expert 13.

A condição ótima determinada pelo software correspondeu a um pH de 6,13, uma concentração de H_2O_2 de 2388 ppm e uma concentração do fotocatalisador TiO_2 de 491 ppm, resultando em um valor de DQO de 313 mg O_2/L e uma desejabilidade de 1,000. Isso indica que se trata de uma solução ideal e completamente satisfatória, de acordo com os critérios estabelecidos no planejamento experimental. Duas condições adicionais com valores de desejabilidade superiores a 0,99 também foram identificadas, indicando a existência de uma zona operacional ótima dentro do espaço experimental estudado.

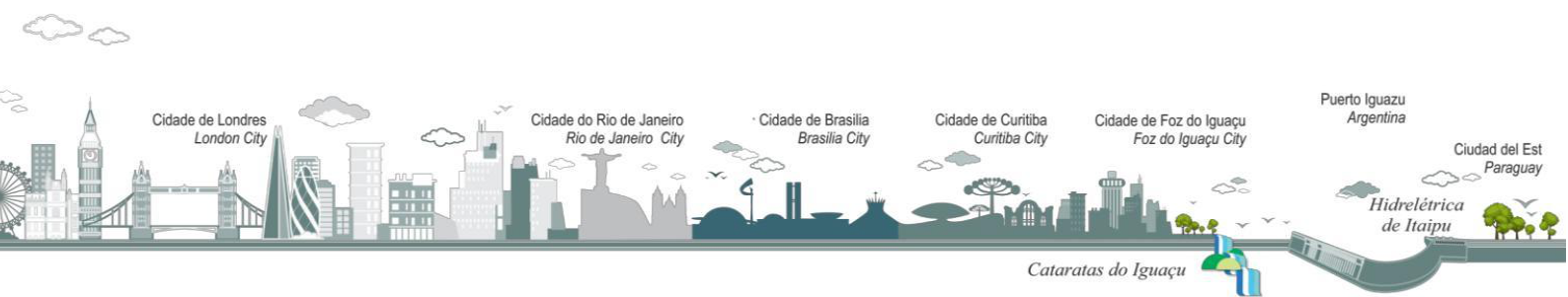
O valor de DQO previsto pelo modelo nessas condições foi de 313 mg O_2/L. O resultado experimental obtido nas condições operacionais ótimas foi de 325 mg O_2/L (Tabela 10).

Tabela 10 - Validação Experimental.

DQO_{modelo} [mgO_2/L]	$DQO_{experimental}$ [mgO_2/L]
313	325

Fonte: Resultados da pesquisa.

Essa diferença representa 3,8% em comparação com o valor previsto pelo modelo e está dentro da margem de erro experimental aceitável, confirmando a validade e a capacidade preditiva do modelo ajustado.



A eficiência do processo H_2O_2/UV/TiO_2 na remoção da carga orgânica, conforme determinado pela equação 3, atingiu 67,07%, o que representa resultados satisfatórios para o tratamento de efluentes têxteis.

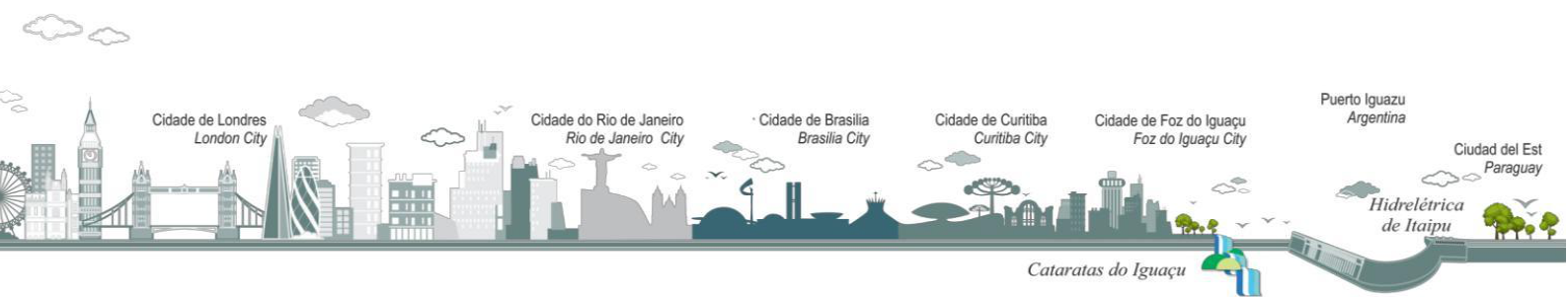
CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo determinou as condições operacionais ótimas para o tratamento de efluentes têxteis utilizando um Processo de Oxidação Avançada, empregando a metodologia de superfície de resposta (MSR) sob um planejamento experimental Box-Behnken. A eficiência do processo foi avaliada pela medição da redução da demanda química de oxigênio (DQO), um parâmetro que quantifica a carga orgânica. Essa DQO foi analisada e corrigida para a presença de H_2O_2 residual no efluente tratado.

A análise estatística utilizando o software Design Expert 13 demonstrou que o modelo quadrático ajustado apresentou um alto nível de significância (valor p = 0,0006) e um bom ajuste (R^2 = 0,9542). A análise de variância (ANOVA) revelou que as variáveis mais influentes foram o pH, a concentração de H_2O_2, suas interações e seus termos quadráticos, todos estatisticamente significativos.

As condições operacionais ótimas, determinadas graficamente (superfície de resposta) e numericamente pelo modelo, apresentaram os seguintes resultados: pH de 6,13, concentração de H_2O_2 de 2388 ppm e concentração de TiO_2 de 491 ppm, resultando em um valor mínimo de DQO de 313 mg O_2/L. A validação experimental nessas condições resultou em um valor de DQO de 325 mg O_2/L, o que representa um desvio de 3,8% em relação ao valor previsto, corroborando a confiabilidade do modelo proposto.

A eficiência do processo H_2O_2/UV/TiO_2 na remoção de matéria orgânica (corantes e surfactantes) em efluentes têxteis foi de 67,07%, considerada satisfatória. Além disso, este estudo fornece conhecimento sólido para a aplicação dessa tecnologia no tratamento de efluentes têxteis, com potencial de escalonamento industrial devido à sua eficiência e sustentabilidade.



International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

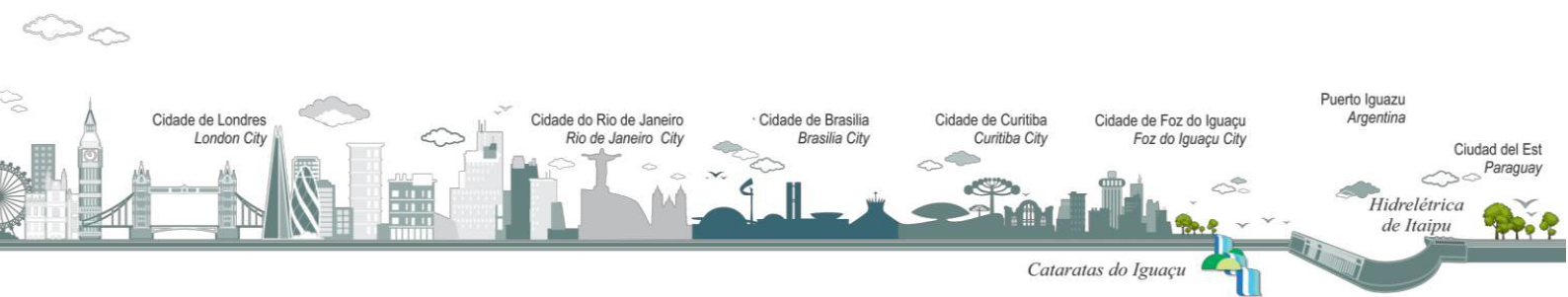
REFERÊNCIAS

ÁLVAREZ, S.; PALOMINO, B. **Evaluación del efecto de la fotólisis en procesos de degradación de soluciones sintéticas del colorante negro reactivo**. Tesis de pregrado – Universidad Nacional de San Antonio Abad, Cusco, 2024.

ALMECIJA, M. C.; HONTORIA, E.; MUÑIO, M. M.; OSORIO, F.; POYATOS, J. M.; TORRES, J. C. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: **State of the Art. Water, Air and Soil Pollution**, v. 205, p. 187–204, 2010.

IRIGOYEN, J. R.; SILERIO, F. J.; PROAL, J. B. Fotocatálisis heterogénea: una breve revisión. **Vidsupra**, n. 6, p. 87–92, 2014.

KIM, S. M.; VOGELPOHL, A. Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 10, p. 33–40, 2004.

LÓPEZ, R. C. **Fotodecoloración de un azocolorante mediante el proceso H_2O_2/UV**. Tesis de licenciatura – Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2021.

ZARUMA, P.; PROAL, J.; CHAIRES, I.; SALAS, H. Los colorantes textiles industriales y tratamientos óptimos de sus efluentes de agua residual. **Revista de la Facultad de Ciencias Químicas Instituto Técnico Nacional**, n. 19, p. 38–47, 2018.