



**Análise e Modelagem da Eficiência de Remoção do Corante Congo
Red por POAs Utilizando Metodologia de Superfície de Resposta (Box-
Behnken)**

Luis Gustavo Santos Correard

Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - FEG
Universidade Paulista Júlio Mesquita Filho - UNESP
lgcorreard@gmail.com

Messias Borges Silva

Escola de Engenharia de Lorena - EEL
Universidade de São Paulo - USP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – FEG
Universidade Paulista Júlio Mesquita Filho – UNESP
messias.silva@unesp.br

Fabício Maciel Gomes

Escola de Engenharia de Lorena - EEL
Universidade de São Paulo - USP
fmgomes@usp.br

Resumo

O estudo apresenta a aplicação do planejamento experimental Box-Behnken na otimização do processo de descoloração de efluente sintético contendo o corante Congo Red, utilizando Processos Oxidativos Avançados (POAs). O objetivo foi avaliar a influência de variáveis operacionais — temperatura, pH e concentração de H_2O_2 — sobre a eficiência de remoção do corante. A análise estatística dos resultados indicou que o modelo obtido é significativo, com alta correlação entre valores experimentais e preditos.

Artigo Completo



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Dentre os fatores avaliados, o pH apresentou o efeito mais expressivo, tanto em termos lineares quanto quadráticos, demonstrando ser a variável de maior impacto na eficiência do processo. A aplicação do delineamento Box-Behnken permitiu a identificação de condições operacionais ótimas com um número reduzido de experimentos, evidenciando sua eficácia na otimização de sistemas complexos. Os resultados confirmam o potencial dos POAs como alternativa viável e sustentável para o tratamento de efluentes contendo compostos recalcitrantes, promovendo a degradação e mineralização dos poluentes. O trabalho reforça, ainda, a importância do uso de metodologias estatísticas no desenvolvimento de processos ambientais eficientes, contribuindo para o avanço das tecnologias de tratamento de águas residuais industriais.

Palavras-chave: Box-Behnken, Processos Oxidativos Avançados, Congo Red,

Abstract

The study presents the application of the Box–Behnken experimental design to optimize the decolorization process of a synthetic effluent containing Congo Red dye using Advanced Oxidation Processes (AOPs). The objective was to evaluate the influence of operational variables — temperature, pH, and H_2O_2 concentration — on the dye removal efficiency. Statistical analysis of the results indicated that the obtained model is significant, showing a strong correlation between experimental and predicted values. Among the evaluated factors, pH exhibited the most significant effect, both in linear and quadratic terms, proving to be the variable with the greatest impact on process efficiency. The application of the Box–Behnken design enabled the identification of optimal operating conditions with a reduced number of experiments, demonstrating its

Artigo Completo



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

effectiveness in optimizing complex systems. The results confirm the potential of AOPs as a viable and sustainable alternative for the treatment of effluents containing recalcitrant compounds, promoting pollutant degradation and mineralization. Furthermore, the study highlights the importance of statistical methodologies in developing efficient environmental processes, contributing to the advancement of industrial wastewater treatment technologies.

Keywords: Box–Behnken, Advanced Oxidation Processes, Congo Red.

Resumen

El estudio presenta la aplicación del diseño experimental Box-Behnken en la optimización del proceso de decoloración de un efluente sintético que contiene el colorante Congo Red, utilizando Procesos Oxidativos Avanzados (POAs). El objetivo fue evaluar la influencia de variables operativas —temperatura, pH y concentración de H_2O_2 — sobre la eficiencia en la eliminación del colorante. El análisis estadístico de los resultados indicó que el modelo obtenido es significativo, con alta correlación entre los valores experimentales y los predichos. Entre los factores evaluados, el pH mostró el efecto más expresivo, tanto en términos lineales como cuadráticos, demostrando ser la variable de mayor impacto en la eficiencia del proceso. La aplicación del diseño Box-Behnken permitió la identificación de condiciones operativas óptimas con un número reducido de experimentos, evidenciando su eficacia en la optimización de sistemas complejos. Los resultados confirman el potencial de los POAs como una alternativa viable y sostenible para el tratamiento de efluentes que contienen compuestos recalcitrantes, promoviendo la degradación y mineralización de los contaminantes. El

Artigo Completo



trabajo refuerza, además, la importancia del uso de metodologías estadísticas en el desarrollo de procesos ambientales eficientes, contribuyendo al avance de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales industriales.

Palabras clave: Box-Behnken, Procesos Oxidativos Avanzados, Congo Red.

1. INTRODUÇÃO

A otimização de processos é um imperativo estratégico para a indústria moderna, servindo como o pilar fundamental para sustentar a competitividade em um mercado global cada vez mais acirrado. Em um cenário de crescente complexidade e volatilidade, a capacidade de uma empresa em refinar suas operações se traduz diretamente em redução de custos, aumento da eficiência e melhoria da qualidade do produto final. A adoção de metodologias avançadas, como a Tomada de Decisão Operacional Inteligente (ODM), que integra tecnologias de ponta como a Inteligência Artificial e a Internet Industrial, é crucial para aprimorar o desempenho e garantir a liderança no setor (CHAI; CHENG, 2025). Esta abordagem sistemática não apenas resolve problemas operacionais existentes, mas também molda as direções futuras da produção industrial, permitindo que as empresas respondam com agilidade às demandas do mercado e superem seus concorrentes.

Neste contexto, o *Design of Experiments* (DoE) emerge como uma ferramenta estatística de valor inestimável, distinguindo-se por sua capacidade de alcançar a otimização de processos com um número significativamente reduzido de experimentos. O DoE permite que os engenheiros e cientistas investiguem simultaneamente o efeito de múltiplas



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

variáveis de entrada (fatores) sobre as variáveis de saída (respostas) de um processo, identificando interações complexas que seriam negligenciadas por abordagens de "uma variável por vez" (JANKOVIC' et al., 2025). Ao aplicar princípios como o fracionamento fatorial e a randomização, o DoE maximiza a informação obtida por teste, minimizando o tempo e os recursos despendidos. Essa eficiência experimental é um fator de peso, pois acelera o ciclo de inovação e melhoria contínua, transformando a otimização de um esforço custoso em uma prática ágil e economicamente viável.

Entre as diversas metodologias do DoE, a Matriz de Box-Behnken (BBD) destaca-se como um design de Superfície de Resposta (RSM) particularmente eficiente para a modelagem e otimização de processos. A BBD é uma alternativa robusta aos designs fatoriais completos e aos designs compostos centrais, sendo especialmente útil quando se deseja modelar a curvatura da superfície de resposta sem a necessidade de um número excessivo de ensaios (CARDOSO et al., 2025). Sua estrutura permite a estimativa de todos os coeficientes de um modelo quadrático, incluindo os termos de interação, com um número menor de pontos experimentais. Por exemplo, enquanto um design fatorial completo para três fatores exigiria 27 experimentos, a BBD consegue a mesma modelagem com apenas 15 experimentos, representando uma economia substancial de recursos.

A utilidade da Matriz de Box-Behnken reside na sua configuração geométrica única, que posiciona os pontos experimentais nos pontos médios das arestas e no centro do cubo experimental, evitando os vértices. Esta característica é de grande importância prática, pois os vértices frequentemente representam condições operacionais extremas que podem ser inviáveis, perigosas ou caras de executar em ambientes industriais. Ao evitar esses extremos, a BBD garante que a experimentação ocorra dentro de uma região de segurança



e viabilidade operacional, tornando-a a escolha preferencial em setores como o desenvolvimento de produtos farmacêuticos, onde a estabilidade e a segurança dos testes são primordiais (BEG; AKHTER, 2021). Sua eficácia em mapear o espaço de fatores de forma econômica e segura consolida a BBD como uma ferramenta de otimização de primeira linha.

Os exemplos de aplicação bem-sucedida da Matriz de Box-Behnken em artigos científicos demonstram seu impacto direto na melhoria da competitividade industrial. Na área de energia, por exemplo, a BBD foi utilizada para otimizar a gaseificação catalítica a vapor, um processo crucial para a produção de hidrogênio, ao modelar e maximizar o rendimento do gás (CHEN et al., 2025). Outros estudos a aplicaram na otimização da extração de compostos bioativos e na remoção de poluentes de efluentes industriais, como o fósforo (CARDOSO et al., 2025). Tais aplicações confirmam a capacidade da BBD de identificar as condições operacionais ideais com precisão e economia de tempo, permitindo que as indústrias atinjam a máxima eficiência e sustentabilidade de seus processos, o que, em última análise, se traduz em uma vantagem competitiva duradoura.

O presente trabalho teve como objetivo principal investigar e modelar a influência de variáveis críticas de processo — especificamente o pH, a temperatura e o volume de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) — sobre a eficiência do processo de descoloração de um efluente sintético contendo o corante Congo Red. Para tal, foi empregada a metodologia de Design de Experimentos (DoE), utilizando a Matriz de Box-Behnken (BBD). Esta abordagem estatística permitiu não apenas avaliar o efeito isolado de cada fator, mas também as interações entre eles, visando a otimização das condições operacionais para maximizar a remoção do corante com o mínimo de experimentos, fornecendo assim um modelo preditivo robusto para a aplicação em escala industrial.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processos Oxidativos Avançados (POAS)

O tratamento de efluentes tradicionalmente emprega uma sequência de processos convencionais, que combinam etapas físico-químicas e biológicas. No entanto, a eficiência moderada desses sistemas em atingir os rigorosos padrões de descarte – especialmente quanto à remoção de compostos eutrofizantes e de microcontaminantes emergentes, como fármacos e pesticidas – representa uma limitação significativa. Ademais, as desvantagens associadas aos reatores biológicos, como a elevada produção de lodo, a sensibilidade a choques tóxicos e a lenta cinética de degradação, reforçam a necessidade de desenvolvimento e implementação de tecnologias capazes de assegurar a qualidade do efluente final em conformidade com as crescentes exigências ambientais (SATYAM; PATRA, 2025).

Diante do cenário atual de escassez hídrica e transição para uma economia circular, técnicas avançadas de tratamento têm sido priorizadas não apenas com o propósito de remediação, mas também visando à recuperação de recursos valiosos presentes nas correntes residuais, favorecendo seu potencial reuso. Essa abordagem tem impulsionado um expressivo aumento nas pesquisas voltadas à valorização de efluentes e à sustentabilidade dos processos de tratamento (KANAKARAJU et al., 2025).

Entre as tecnologias emergentes, destacam-se os Processos Oxidativos Avançados (POAs), reconhecidos como alternativas robustas e altamente promissoras para a degradação de contaminantes recalcitrantes. Esses processos se caracterizam pela geração *in situ* de espécies oxidantes de elevada reatividade, em especial o radical hidroxila ($\cdot\text{OH}$), capaz de promover a mineralização ou transformação de poluentes de alta

estabilidade química. Dessa forma, os POAs superam as limitações dos métodos convencionais e oferecem uma rota viável e sustentável para o tratamento de águas residuais.

Os POAs constituem um conjunto de metodologias baseadas na geração, em meio aquoso, de espécies transientes altamente reativas (VILHUNEN; SILLANPää, 2010; KUN-TUBEK et al., 2020). O radical hidroxila ($\cdot\text{OH}$) é o principal agente oxidante envolvido nesses processos, apresentando um dos mais altos potenciais padrão de redução conhecidos, conforme representado na Equação 1.



O poder oxidante do radical hidroxila é superado apenas pelo flúor, conforme apresentado na Tabela 1, que reúne os potenciais padrão de redução (E^0) de espécies químicas relevantes.

Devido ao seu elevado poder oxidante e baixa seletividade, o radical hidroxila reage rapidamente com uma ampla variedade de compostos orgânicos. Seu caráter eletrofílico favorece a oxidação de diferentes substratos, resultando na conversão dos contaminantes em produtos de menor toxicidade, como dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e íons inorgânicos derivados dos heteroátomos originalmente presentes — processo conhecido como mineralização.

Tabela 1: Potenciais Padrão de Redução de Relevantes Espécies Oxidantes (SILVA et al., 2014; SOUZA, 2010).

Agente Oxidante	Meia-Reação de Redução (Meio Ácido)	Potencial Padrão de Redução (E^0) [V]
Flúor (F_2)	$F_2 + 2e^- \rightarrow 2F^-$	+2,87
Radical Hidroxila ($\cdot OH$)	$\cdot OH + e^- + H^+ \rightarrow H_2O$	+2,80
Persulfato ($S_2O_8^{2-}$)	$S_2O_8^{2-} + 2e^- \rightarrow 2SO_4^{2-}$	+2,01
Ozônio (O_3)	$O_3 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow O_2 + H_2O$	+2,07
Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2)	$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O$	+1,77
Permanganato (MnO_4^-)	$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$	+1,51
Cloro (Cl_2)	$Cl_2 + 2e^- \rightarrow 2Cl^-$	+1,36
Oxigênio Molecular (O_2)	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	+1,23

Além de sua potência, o radical hidroxila apresenta facilidade de geração e elevada eficiência cinética, parâmetros que podem ser ajustados conforme o sistema de POA adotado (HUANG; ZHANG, 2022).

A principal vantagem dos Processos Oxidativos Avançados reside em seu caráter destrutivo, em contraste com os métodos físico-químicos convencionais — como adsorção, filtração, precipitação, coagulação, floculação, sedimentação, flotação, separação por membranas, osmose reversa, extração, destilação e evaporação (YEOH et al., 2022) —, que apenas promovem a transferência dos contaminantes entre fases, geralmente da líquida para a sólida. Essa abordagem não elimina o passivo ambiental, uma vez que o material contaminado ainda necessita de disposição ou tratamento final, elevando os custos e mantendo os riscos associados (KUNZ et al., 2002).



Em contrapartida, os POAs promovem a degradação química efetiva e mineralização dos poluentes, eliminando o problema em sua origem e representando uma alternativa estratégica e sustentável para o tratamento de águas e efluentes (KANAKARAJU et al., 2025).

2.2 Planejamento de Experimentos

O Planejamento de Experimentos (Design of Experiments - DOE) é uma sofisticada e essencial metodologia estatística que abrange o planejamento rigoroso, a condução criteriosa, a análise aprofundada e a interpretação objetiva de testes controlados. Seu objetivo primordial é desvendar e quantificar a complexa relação de causa e efeito, identificando com precisão os fatores (variáveis de entrada) que exercem influência significativa sobre os valores de um ou mais parâmetros de desempenho (variáveis de resposta) de um sistema ou processo (SHINA, 2022).

Diferentemente das abordagens tradicionais que alteram um fator por vez, o princípio básico do DOE, fundamentado na eficiência estatística, reside na capacidade de variar simultaneamente e de maneira estruturada todos os níveis das variáveis, sejam elas de natureza discreta ou contínua. Essa estratégia programada e racional se traduz em uma aceleração notável na curva de aprendizado. Ela permite extrair a máxima informação com o número mínimo de experimentos, superando a limitação de análise de poucos fatores e, crucialmente, revelando as interações entre eles, ou seja, como o efeito de uma variável depende do nível em que a outra se encontra (ANTONY et al., 2024).

A aplicabilidade do Planejamento de Experimentos se estende por um vasto leque de domínios, desde a engenharia de manufatura e o desenvolvimento de novos produtos até a pesquisa científica e a biotecnologia. Suas aplicações têm um impacto transformador,

forneendo uma base sólida para a otimização de processos e a tomada de decisões baseada em dados. Ao identificar as configurações ótimas e as fontes de variação, o DOE garante um aumento expressivo na previsibilidade dos resultados, ao mesmo tempo em que promove a redução de custos e o aumento da produtividade e da qualidade do processo em questão (HSIEH et al., 2023)

3.2.1 Delineamento Box-Behnken

O Delineamento de Box-Behnken (BBD) constitui uma abordagem estatística crucial no Planejamento de Experimentos (DoE), sendo a ferramenta de escolha na Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) para a determinação de condições ótimas de um processo. Sua maior contribuição reside na capacidade de gerar um modelo matemático quadrático preditivo de forma eficiente e segura (BOX; BEHNKEN, 1960; MYERS et al., 2016). A obtenção de um modelo matemático de segunda ordem é o cerne do BBD. Através do ajuste de uma equação polinomial de grau 2, que incorpora termos lineares, quadráticos (curvatura) e de interação entre dois fatores, é possível descrever a relação empírica entre as variáveis independentes (x_i) e a variável de resposta (y), conforme demonstrado na Equação 2.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

Esta estrutura de modelo é essencial, pois permite a identificação não apenas dos efeitos principais e das interações, mas também da curvatura, que é fundamental para localizar e prever o ponto de máximo ou mínimo da resposta. O BBD alcança essa capacidade utilizando apenas três níveis por fator (baixo, médio e alto), o que é o número mínimo necessário para estimar todos os coeficientes quadráticos (FERREIRA et al., 2007).

Em termos operacionais, o BBD demonstra notável eficiência experimental. Exige um número de runs inferior ao do delineamento fatorial completo (3^k) e frequentemente menor do que o Delineamento Composto Central (DCC) para o mesmo número de fatores. Esta economia de experimentos minimiza o tempo, os custos e o consumo de recursos necessários para a modelagem do sistema (JONES; MONTGOMERY, 2020).

Adicionalmente, a configuração do BBD contribui diretamente para a segurança e a viabilidade prática dos experimentos. O delineamento é construído para evitar deliberadamente que todos os fatores atinjam seus níveis extremos (máximo ou mínimo) simultaneamente, excluindo os vértices do espaço experimental. Ao concentrar os pontos nas faces e no centro, o BBD garante que a experimentação ocorra em uma região operacional mais segura e realista, crucial quando as condições extremas podem ser perigosas ou fisicamente impossíveis de replicar.

Mittal e Phutela (2023) utilizaram o BBD (três fatores, três níveis) para modelar e otimizar as propriedades mecânicas de biocompósitos (fibra de folha de abacaxi/HDPE/MAPE). O estudo enfatiza que os resultados experimentais se ajustaram bem aos modelos matemáticos preditos, conforme confirmado pela Análise de Variância (ANOVA) e pelos altos coeficientes de determinação (R^2), validando o uso do BBD para descrever o comportamento do material.

Mahmoud e McConville (2023) empregaram o BBD para desenvolver uma correlação entre variáveis independentes (quantidade de polímero e fármaco, e concentração de surfactante) e as características das nanopartículas (tamanho, carga zeta e eficiência de encapsulação). Os modelos matemáticos gerados pelo BBD foram usados para prever as

condições ótimas de formulação, com a análise estatística confirmando que o modelo era um bom ajuste para os dados experimentais.

3. MÉTODO

3.1 Procedimento Experimental

O efluente sintético foi preparado pela diluição do corante Vermelho do Congo em 6 litros de água destilada, sendo a massa de corante ajustada conforme os níveis definidos na matriz experimental. A solução obtida foi mantida à temperatura ambiente e homogeneizada em um reservatório de plástico de 6 L.

Em seguida, foram acionados a bomba de recirculação e o banho termostático, permitindo o controle da temperatura da solução, que foi ajustada de acordo com as condições estabelecidas na matriz experimental. O pH do efluente foi determinado com o auxílio de um pH-metro e corrigido para os valores desejados mediante a adição de solução 0.5eq·L⁻¹ de ácido sulfúrico (H₂SO₄) ou 0.5eq · L⁻¹ de hidróxido de sódio (NaOH), conforme a necessidade.

Após a estabilização da temperatura, foi coletada uma amostra de 10 mL para a determinação da concentração inicial do corante, por meio de espectrofotometria. Em seguida, foi adicionado o peróxido de hidrogênio (H₂O₂) à solução, e a lâmpada do reator foi acionada, iniciando-se a emissão de radiação UV e o processo de oxidação.

Após 60 minutos de reação, foram coletadas alíquotas de 10 mL, analisadas em espectrofotômetro para determinar a concentração residual do corante no efluente tratado.

4.2 Condições Operacionais

Os experimentos foram conduzidos em modo de recirculação contínua, mantendo-se o volume útil de 1 L no reator tubular Germetec (modelo GPJ-463/1). O sistema foi equipado com uma lâmpada de mercúrio de baixa pressão do tipo GPH-463T5L, que emite radiação UV a 254 nm, com potência nominal de 28 W, protegida por um tubo de quartzo, que pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1: Reator Tubular para Tratamento Fotoquímico



Os experimentos foram conduzidos com base em um planejamento estatístico fatorial do tipo Box-Behnken, tendo como variável resposta o percentual de redução da concentração do corante em relação à condição inicial de cada ensaio. As variáveis independentes (fatores) consideradas neste estudo foram: temperatura, pH e concentração de peróxido de hidrogênio (H_2O_2).

A Tabela 2 apresenta as variáveis experimentais e os níveis selecionados para o planejamento, definidos de modo a permitir a avaliação dos efeitos principais e das interações entre os fatores sobre a eficiência do processo de descoloração.

Tabela 2: Fatores de controle e níveis para o estudo da descoloração de efluente sintético, utilizando a matriz de Box-Benhken

Fator	Simbologia	Codificado		
		-1	0	+1
Temperatura (°C)	A	25	35	45
Volume de H ₂ O ₂	B	2	11	20
pH	C	2	7	12

Os Experimentos foram conduzidos de acordo com a matriz experimental ilustrada na Tabela 3.

Tabela 3: Matriz Box-Benhken

Experimento	Temperatura	Volume de H ₂ O ₂	pH
	(Fator A)	(Fator B)	(Fator C)
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos da decoloração do efluente sintético, empregando-se a matriz experimental de Box-Behnken, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados da Decoloração do Efluente Sintético

Experimento	Fator			Descoloração (%)
	A	B	C	Y
1	-1	-1	0	87,11
2	1	-1	0	88,07
3	-1	1	0	96,17
4	1	1	0	89,81
5	-1	0	-1	66,17
6	1	0	-1	74,82
7	-1	0	1	97,00
8	1	0	1	93,78
9	0	-1	-1	60,05
10	0	1	-1	58,73
11	0	-1	1	95,74
12	0	1	1	99,09
13	0	0	0	92,89
14	0	0	0	90,65
15	0	0	0	94,56

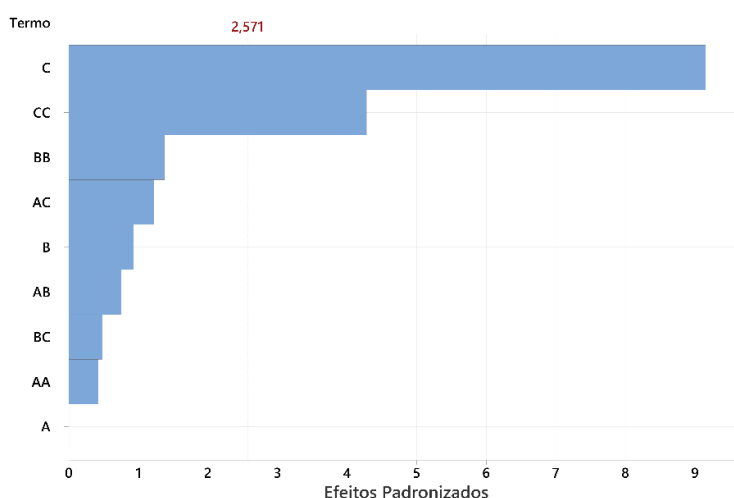
A Análise de Variância (ANOVA) dos dados e o Gráfico de Pareto dos efeitos, podem ser visualizados na Tabela 5 e na Figura 2, respectivamente.

Tabela 5: ANOVA dos Resultados

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	2528,76	280,97	11,89	0,007
Linear	3	2000,04	666,68	28,21	0,001
A	1	0	0	0	0,998
B	1	20,58	20,58	0,87	0,394
C	1	1979,46	1979,46	83,75	0
Quadrado	3	474,65	158,22	6,69	0,033
A*A	1	4,19	4,19	0,18	0,691
B*B	1	44,59	44,59	1,89	0,228
C*C	1	432,47	432,47	18,3	0,008
Interação com 2 Fatores	3	54,07	18,02	0,76	0,562
A*B	1	13,4	13,4	0,57	0,485
A*C	1	35,22	35,22	1,49	0,277
B*C	1	5,45	5,45	0,23	0,651
Erro	5	118,17	23,63		
Falta de ajuste	3	110,47	36,82	9,57	0,096
Erro puro	2	7,7	3,85	*	*
Total	14	2646,94			

A Análise de Variância (ANOVA) indica que o modelo geral é estatisticamente significativo (Valor-P = 0,007), explicando uma parcela considerável da variabilidade da res- posta. A significância do modelo é impulsionada, principalmente, pelos termos lineares (Valor-P = 0,001) e quadráticos (Valor-P = 0,033), enquanto os termos de interação de dois fatores não são significativos (Valor-P = 0,562). O teste de Falta de Ajuste, com Valor-P = 0,096, sugere que o modelo é adequado para representar os dados, visto que a falta de ajuste não é significativa ao nível de 5%.

Figura 2: Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados



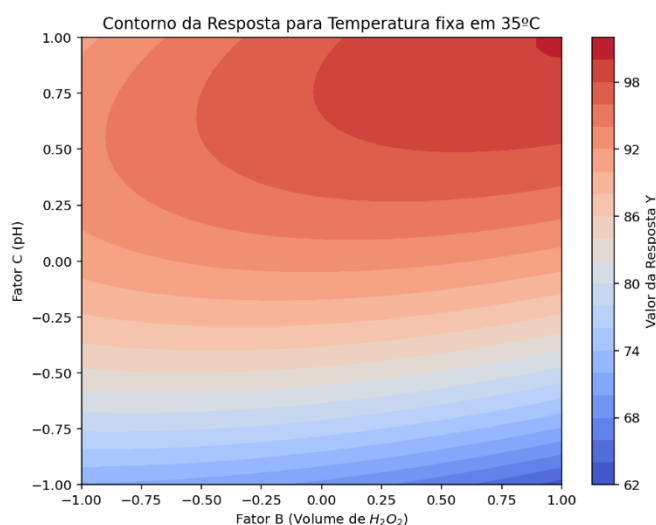
Ao examinar os termos individuais, o Fator C (pH) se destaca como o único componente significativo, tanto em seu efeito linear (Valor-P = 0,000) quanto em seu efeito quadrático (Valor-P = 0,008). Isso aponta para a importância do Fator C (pH) na determinação da resposta, com a relação apresentando uma curvatura (necessidade de modelar um ponto de máximo/mínimo). Por outro lado, os Fatores A (temperatura) e B (volume de H_2O_2), bem como todas as interações de dois fatores (AB, AC, B*C), não são estatisticamente significativos, indicando que a variação observada é quase totalmente atribuível ao Fator C (pH).

O modelo matemático que descrevem o comportamento do processo de descoloração está representado na Equação 3:

$$y = 92,70 + 0,90 \cdot B + 15,03 \cdot C + 0,36 \cdot A^2 - 2,77 \cdot B^2 - 10,12 \cdot C^2 - 1,83 \cdot A \cdot B - 2,97 \cdot A \cdot C + 2,567 \cdot B \cdot C \quad (3)$$

O Gráfico da Superfície de Contorno da Descoloração do Efluente Sintético (Y) versus o Fator C (pH) e o Fator B (volume de H_2O_2), com o Fator A (temperatura) fixado em 0, ilustra as regiões de otimização da Resposta Y em função da combinação dos Fatores C e B e pode ser visualizada na Figura 3.

Figura 3: Superfície de Contorno



A análise visual revela uma clara tendência de crescimento da Resposta Y em direção ao topo do gráfico, ou seja, à medida que o Fator C aumenta (em direção a 1.0). As regiões de máximo valor de Y (tons de vermelho escuro, acima de 90%) estão concentradas na parte superior do gráfico (C positivo), estendendo-se por toda a faixa do Fator B. Por

outro lado, as regiões de menor resposta (tons de azul, abaixo de 75%) estão confinadas à parte inferior do gráfico, onde o Fator C é negativo (próximo a -1.0).

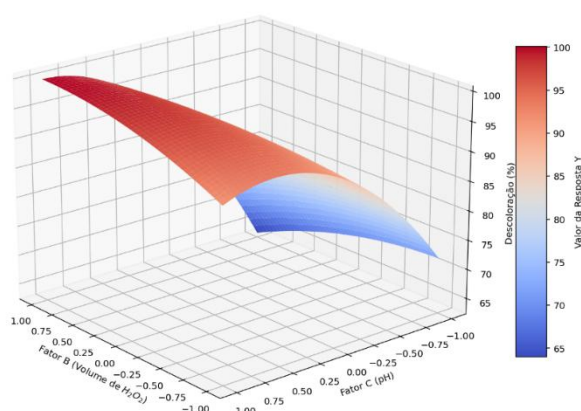
O Fator C demonstra ser o fator dominante na otimização da Resposta Y, pois a transição de respostas baixas para altas é determinada primariamente pelo seu aumento, passando de -0.5 para 0.5 . Em contraste, o Fator B (eixo horizontal) tem um efeito relativamente menor sobre a Resposta Y na faixa estudada, com as curvas de contorno sendo quase paralelas ao eixo B. Embora a região de máxima resposta (acima de 95) seja ligeiramente mais ampla em valores de B ligeiramente negativos (próximo a -0.5), o aumento do Fator C é a condição essencial para se atingir o ótimo da Resposta Y quando o Fator A é fixado no nível 0.

O gráfico de Superfície de Resposta em 3D, com o Fator A (Temperatura) fixo em 0.0, ilustra o impacto dos fatores: Fator B (volume de H_2O_2) e Fator C (pH) na Resposta Y (Descoloração do Efluente Sintético), encontra-se apresentado na Figura 4.

A superfície apresenta uma curvatura complexa que sugere a presença de um ponto de sela ou um ótimo muito deslocado, caracterizado por uma região de máximo e uma região de mínimo. A superfície é côncava para baixo em relação ao Fator B e convexa para baixo em relação ao Fator C na região central. Para a otimização do processo, a análise visual revela que a Resposta Y é maximizada (região vermelha, próximos a 100) quando o Fator B está em seu nível mais baixo (próximo a -1.0) e o Fator C está em seu nível mais alto (próximo a 1.0). Por outro lado, a Resposta Y é minimizada (região azul, próximos a 65) quando o Fator B está em seu nível mais alto (próximo a 1.0) e o Fator C está em seu nível mais baixo (próximo a -1.0). Para atingir a máxima resposta, a estratégia é combinar um nível baixo do Fator B com um nível alto do Fator C.

Figura 4: Superfície de Resposta

Superfície de Resposta para Temperatura fixa em 35°C



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do delineamento Box-Behnken (BBD) demonstrou ser uma ferramenta estatística altamente eficaz na modelagem e otimização do processo de descoloração do efluente sintético contendo o corante *Congo Red*. Por meio dessa metodologia, foi possível identificar com precisão a influência e a significância de cada variável independente — temperatura, pH e volume de H_2O_2 —, bem como suas possíveis interações. A análise de variância (ANOVA) revelou que o modelo ajustado é estatisticamente significativo, com destaque para o pH como fator determinante da eficiência de remoção do corante. A estrutura experimental do BBD permitiu a obtenção de resultados robustos com um número reduzido de ensaios, evidenciando sua capacidade



de otimizar recursos, reduzir custos experimentais e maximizar o conteúdo informacional dos testes realizados.

Além de sua eficiência estatística, o delineamento Box-Behnken mostrou-se essencial para o desenvolvimento de um modelo preditivo confiável, capaz de representar adequadamente o comportamento do sistema e orientar a definição de condições operacionais ótimas. Essa abordagem, quando associada aos Processos Oxidativos Avançados (POAs), potencializa o desempenho do tratamento de efluentes, promovendo a degradação química e a mineralização de contaminantes orgânicos de forma sustentável. Assim, o uso do BBD não apenas contribui para a compreensão dos fenômenos envolvidos, mas também se consolida como uma ferramenta estratégica para o aprimoramento e a escalabilidade de processos ambientais avançados, reforçando sua aplicabilidade na engenharia de processos e na gestão sustentável de recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

ANTONY, J.; BHAT, S.; MITTAL, A.; JAYARAMAN, R.; GIJO, E.; CUDNEY, E. A. Application of taguchi design of experiments in the food industry: a systematic literature review. *Total Quality Management and Business Excellence*, Informa UK Limited, v. 35, n. 5–6, p. 687–712, mar. 2024. ISSN 1478-3371.

BEG, S.; AKHTER, S. Box-behnken designs and their applications in pharmaceutical product development. In: . *Design of Experiments for Pharmaceutical Product Development*. [S.l.]: Springer Singapore, 2021. p. 77–85. ISBN 9789813347175.

BOX, G. E. P.; BEHNKEN, D. W. Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics*, Informa UK Limited, v. 2, n. 4, p. 455–475, nov. 1960. ISSN 1537-2723.

CARDOSO, C. E. D.; ALMEIDA, J. C.; ROCHA, J.; PEREIRA, E. Application of box-behnken design to optimize the phosphorus removal from industrial wastewaters using

magnetic nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research*, Springer Science and Business Media LLC, v. 32, n. 11, p. 6804–6816, fev. 2025. ISSN 1614-7499.

CHAI, T.; CHENG, S. Intelligent operational decision-making in industrial process: Development and prospects. *Engineering*, Elsevier BV, v. 52, p. 40–52, set. 2025. ISSN 2095-8099.

CHEN, W.-H.; CHENG, C.-Y.; CHIH, Y.-K.; CHEIN, R.-Y.; LIN, K.-Y. A.; SARAVANAKUMAR, A. Hydrogen production optimization from methanol steam reforming using box-behnken design, analysis of variance, and artificial neural network. *International Journal of Hydrogen Energy*, Elsevier BV, v. 140, p. 1163–1177, jun. 2025. ISSN 0360-3199.

FERREIRA, S.; BRUNS, R.; FERREIRA, H.; MATOS, G.; DAVID, J.; BRANDÃO, G.; SILVA, E. da; PORTUGAL, L.; REIS, P. dos; SOUZA, A.; SANTOS, W. dos. Box-behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica Chimica Acta*, Elsevier BV, v. 597, n. 2, p. 179–186, ago. 2007. ISSN 0003-2670.

HSIEH, C.-M.; YANG, T.-L.; PUTRI, A. D.; CHEN, C.-T. Application of design of experiments in the development of self-microemulsifying drug delivery systems. *Pharmaceuticals*, MDPI AG, v. 16, n. 2, p. 283, fev. 2023. ISSN 1424-8247.

HUANG, K.; ZHANG, H. A comprehensive kinetic model for phenol oxidation in seven advanced oxidation processes and considering the effects of halides and carbonate. *Water Research X*, Elsevier BV, v. 14, p. 100129, jan. 2022. ISSN 2589-9147.

JANKOVIC', A.; CHAUDHARY, G.; GOIA, F. Optimization through classical design of experiments (doe): An investigation on the performance of different factorial designs for multi-objective optimization of complex systems. *Journal of Building Engineering*, Elsevier BV, v. 102, p. 111931, maio 2025. ISSN 2352-7102.

JONES, B.; MONTGOMERY, D. C. *Design of experiments: A modern approach*. Hoboken, NJ: Wiley, 2020. ISBN 9781119746010.



KANAKARAJU, D.; GLASS, B. D.; GOH, P. S. Advanced oxidation process-mediated removal of pharmaceuticals from water: a review of recent advances. *Environmental Science and Pollution Research*, Springer Science and Business Media LLC, v. 32, n. 24, p. 14316–14350, maio 2025. ISSN 1614-7499.

KUNTUBEK, A.; KINAYAT, N.; MEIRAMKULOVA, K.; POULOPOULOS, S. G.; BEAR, J. C.; INGLEZAKIS, V. J. Catalytic oxidation of methylene blue by use of natural zeolite-based silver and magnetite nanocomposites. *Processes*, MDPI AG, v. 8, n. 4, p. 471, abr. 2020. ISSN 2227-9717.

KUNZ, A.; MANSILLA, H.; DURÁN, N. A degradation and toxicity study of three textile reactive dyes by ozone. *Environmental Technology*, Informa UK Limited, v. 23, n. 8, p. 911–918, ago. 2002. ISSN 1479-487X.

MAHMOUD, B. S.; MCCONVILLE, C. Box-behnken design of experiments of polycaprolactone nanoparticles loaded with irinotecan hydrochloride. *Pharmaceutics*, MDPI AG, v. 15, n. 4, p. 1271, abr. 2023. ISSN 1999-4923.

MITTAL, M.; PHUTELA, K. Modeling and parameters optimization of biocomposite using box-behnken response surface methodology. *Journal of Applied Research and Technology*, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, v. 21, n. 6, p. 991–1018, dez. 2023. ISSN 1665-6423.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. *Response Surface Methodology : Process and product optimization using designed experiments*. 1st ed.. ed. Newark: John Wiley & Sons, Incorporated, 2016. (New York Academy of Sciences Series). Description based on publisher supplied metadata and other sources. ISBN 9781118916025.

SATYAM, S.; PATRA, S. The evolving landscape of advanced oxidation processes in wastewater treatment: Challenges and recent innovations. *Processes*, MDPI AG, v. 13, n. 4, p. 987, mar. 2025. ISSN 2227-9717.

SHINA, S. *Industrial design of experiments: A case study approach for design and process optimization*. Cham: Springer, 2022. ISBN 9783030862695.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

VILHUNEN, S.; SILLANPää, M. Recent developments in photochemical and chemical aops in water treatment: a mini-review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, Springer Science and Business Media LLC, v. 9, n. 4, p. 323–330, ago. 2010. ISSN 1572-9826.

YEOH, J. X.; JAMIL, S. N. A. M.; SYUKRI, F.; KOYAMA, M.; MOBAREKEH, M. N. Comparison between conventional treatment processes and advanced oxidation processes in treating slaughterhouse wastewater: A review. *Water*, MDPI AG, v. 14, n. 22, p. 3778, nov. 2022. ISSN 2073-4441.