

Tratamento de efluente industrial por meio de microfiltração em escala de bancada visando reúso de água

Vitor Mauri Marcos

Discente, UFSCar, Brasil
vitormaurimarcos@estudante.ufscar.br
ORCID: 0009-0009-3012-5385

Cali Laguna Achon

Professora Doutora, UFSCar, Brasil
caliachon@ufscar.br
ORCID: 0000-0001-5819-8089

Tratamento de efluente industrial por meio de microfiltração em escala de bancada visando reúso de água

RESUMO

Objetivo - Avaliar o processo físico de microfiltração em escala de bancada para o tratamento do efluente industrial proveniente do sistema CIP (Clean in Place) da indústria cervejeira, analisando parâmetros de qualidade como cor, turbidez e pH, e verificando o efeito da centrifugação como pré-tratamento visando o reúso não potável da água.

Metodologia - O estudo foi desenvolvido em escala de bancada, empregando centrifugação como etapa preliminar e microfiltração com membranas de fibra de vidro de porosidade < 1,0 µm. As análises de cor (Pt-Co), turbidez (NTU) e pH foram realizadas em triplicata, seguindo as normas da AWWA (2012). Foram conduzidos cinco ensaios, sendo três com amostra bruta (50, 100 e 150 mL) e dois com amostra centrifugada (50 mL com membrana nova e 50 mL com membrana reutilizada).

Originalidade/relevância - O trabalho explora a associação entre centrifugação e microfiltração para o tratamento de efluente de CIP, uma combinação ainda pouco abordada na literatura para a indústria cervejeira. A pesquisa contribui com uma alternativa de baixo custo e aplicabilidade prática para o reúso de água industrial, alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Resultados - A centrifugação promoveu remoções de aproximadamente 82 % da cor e 95 % da turbidez, configurando-se como pré-tratamento eficiente. A microfiltração aplicada diretamente ao efluente bruto apresentou colmatção precoce e reduções inferiores a 30 %. Por outro lado, a microfiltração do efluente centrifugado reduziu a cor para $128 \pm 2,5$ Pt-Co e a turbidez para $112 \pm 2,0$ NTU, atingindo remoções acima de 85 %. O reúso da membrana indicou redução de eficiência na remoção de cor devido ao fouling.

Contribuições teóricas/metodológicas - O estudo aprofunda o entendimento da colmatção de membranas no tratamento de efluentes alcalinos e propõe um modelo experimental reproduzível para análises comparativas futuras.

Contribuições sociais e ambientais - A pesquisa reforça a viabilidade do reúso de água em processos não potáveis da indústria cervejeira, contribuindo para a economia de recursos hídricos e redução da carga poluidora de efluentes industriais.

PALAVRAS-CHAVE: reúso de água; efluente industrial; CIP; centrifugação; microfiltração.

Treatment of industrial effluent by bench-scale microfiltration aiming at water reuse

ABSTRACT

Objective – To evaluate the bench-scale microfiltration process for the treatment of industrial effluent generated from the CIP (Clean in Place) system of a brewery, analyzing color, turbidity, and pH as quality parameters, and verifying the effect of centrifugation as a pretreatment step aiming at non-potable water reuse.

Methodology – The study was carried out at a bench scale, employing centrifugation as a preliminary stage and microfiltration using glass fiber membranes with pore size < 1.0 µm. Color (Pt-Co), turbidity (NTU), and pH analyses were performed in triplicate, following AWWA (2012) standards. Five tests were conducted: three with raw effluent (50, 100, and 150 mL) and two with centrifuged effluent (50 mL with a new membrane and 50 mL with a reused membrane).

Originality/Relevance – The study explores the combination of centrifugation and microfiltration for treating CIP effluent, a scarcely investigated approach in brewery wastewater management. It provides a low-cost and practical alternative for industrial water reuse, aligned with the Sustainable Development Goals.

Results – Centrifugation promoted approximately 82% color and 95% turbidity removal, proving to be an effective pretreatment. Microfiltration applied directly to raw effluent showed early membrane fouling and removals below 30%. Conversely, microfiltration of the centrifuged effluent reduced color to 128 ± 2.5 Pt-Co and turbidity to 112 ± 2.0 NTU, achieving removals above 85%. Membrane reuse showed decreased color removal efficiency due to fouling accumulation.

Theoretical/Methodological Contributions – This study enhances the understanding of membrane fouling during the treatment of alkaline effluents and provides a reproducible experimental model for comparative future studies.

Social and Environmental Contributions – The research reinforces the feasibility of water reuse in non-potable brewery processes, contributing to water resource conservation and the reduction of industrial effluent discharge.

KEYWORDS: water reuse; industrial effluent; CIP; centrifugation; microfiltration.

Tratamiento de efluente industrial mediante microfiltración a escala de laboratorio con el objetivo de reutilización del agua

RESUMEN

Objetivo – Evaluar el proceso de microfiltración a escala de laboratorio para el tratamiento del efluente industrial generado por el sistema CIP (Clean in Place) de una cervecería, analizando parámetros de calidad como color, turbidez y pH, y verificando el efecto de la centrifugación como pretratamiento con el objetivo de la reutilización no potable del agua.

Metodología – El estudio se realizó a escala de laboratorio, utilizando la centrifugación como etapa preliminar y la microfiltración con membranas de microfibras de vidrio con porosidad $< 1,0 \mu\text{m}$. Los análisis de color (Pt-Co), turbidez (NTU) y pH se realizaron por triplicado, siguiendo las normas de la AWWA (2012). Se realizaron cinco ensayos: tres con efluente bruto (50, 100 y 150 mL) y dos con efluente centrifugado (50 mL con membrana nueva y 50 mL con membrana reutilizada).

Originalidad/Relevancia – El trabajo explora la combinación de centrifugación y microfiltración para el tratamiento de efluentes CIP, una línea de investigación poco abordada en la industria cervecera. La investigación propone una alternativa de bajo costo y aplicabilidad práctica para la reutilización de agua industrial, en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Resultados – La centrifugación permitió reducciones de aproximadamente 82 % en el color y 95 % en la turbidez, funcionando como un pretratamiento eficaz. La microfiltración aplicada directamente al efluente bruto presentó colmatación temprana y reducciones inferiores al 30 %. Por el contrario, la microfiltración del efluente centrifugado redujo el color a $128 \pm 2,5$ Pt-Co y la turbidez a $112 \pm 2,0$ NTU, alcanzando reducciones superiores al 85 %. El reuso de la membrana mostró una menor eficiencia en la remoción del color debido al ensuciamiento.

Contribuciones Teóricas/Metodológicas – El estudio amplía la comprensión sobre la colmatación de membranas en el tratamiento de efluentes alcalinos y propone un modelo experimental reproducible para futuros estudios comparativos.

Contribuciones Sociales y Ambientales – La investigación refuerza la viabilidad de la reutilización de agua en procesos no potables de la industria cervecera, contribuyendo a la conservación de los recursos hídricos y a la reducción de la carga contaminante de los efluentes industriales.

PALABRAS CLAVE: reutilización de agua; efluente industrial; CIP; centrifugación; microfiltración.

1 INTRODUÇÃO

O crescente consumo de água em atividades industriais tem gerado preocupação em relação à escassez hídrica e à necessidade de adoção de práticas de reúso. Entre os setores de destaque está a indústria cervejeira, na qual o sistema Clean in Place (CIP) é amplamente utilizado para limpeza e sanitização de tanques e tubulações, consumindo grandes volumes de água e gerando efluentes alcalinos com presença de soda cáustica, resíduos orgânicos e sólidos suspensos.

O descarte inadequado desse efluente pode causar impactos ambientais significativos, como alteração de pH e contaminação de corpos d'água, tornando essencial o desenvolvimento de alternativas de tratamento que permitam seu reaproveitamento parcial. O reúso não se limita apenas à economia de água, mas também à possibilidade de recuperação parcial da soda residual, reduzindo custos operacionais e o consumo de insumos químicos.

Entre as tecnologias de tratamento disponíveis, os processos de separação por membranas, como a microfiltração, têm se mostrado eficientes para remoção de cor, turbidez e sólidos suspensos, além de apresentarem potencial de aplicação em escala compacta e de baixo custo energético (EZUGBE & RATHILAL, 2020). Estudos recentes destacam ainda a importância do pré-tratamento — como a centrifugação — para minimizar o entupimento das membranas (fouling) e aumentar sua vida útil (DEVASY et al., 2023; KATO et al., 2024).

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho combinado de centrifugação e microfiltração no tratamento do efluente CIP proveniente de uma indústria cervejeira, analisando a redução de cor e turbidez e a estabilidade de pH, visando o reúso do efluente em atividades não potáveis do próprio processo industrial.

2 OBJETIVOS

Avaliar a eficiência da centrifugação e da microfiltração em escala de bancada na melhoria dos parâmetros de qualidade do efluente CIP de cervejaria, visando o reúso não potável da água.

A seguir tem-se os objetivos específicos desta pesquisa:

- Analisar as características do efluente bruto e do efluente centrifugado;
- Analisar a eficiência da microfiltração de amostra bruta;
- Analisar a eficiência da microfiltração de amostra centrifugada;
- Avaliar a influência da centrifugação como pré-tratamento da microfiltração.

3 METODOLOGIA

3.1 Origem da amostra

As amostras utilizadas neste estudo foram provenientes do processo de higienização de equipamentos da indústria cervejeira, realizado pelo sistema CIP (Clean in Place). Esse sistema utiliza soluções cáusticas e detergentes alcalinos, resultando em efluentes com elevado pH e alta carga de sólidos suspensos.

3.2 Caracterização inicial

Antes dos ensaios de separação, as amostras foram caracterizadas em termos de:

- Cor aparente: após diluições quando necessárias.
- Turbidez: após diluições quando necessárias.
- pH

Todas as análises foram realizadas em triplicata.

A Tabela 1 ilustra os métodos utilizados para análise dos parâmetros de caracterização das amostras de efluentes.

Tabela 1 – Métodos utilizados para análise dos parâmetros de caracterização das amostras de efluentes.

Parâmetro	Unidade	Método ⁽¹⁾	Equipamento
Cor aparente	Pt-Co	2120 C	Espectrofotômetro DR 2010
Turbidez	NTU	2130 B	Turbidímetro 2100P
pH	-	4500-H+ B	pHmetro

Fonte: Autor (2025).

⁽¹⁾ Método baseado na AWWA (2012)

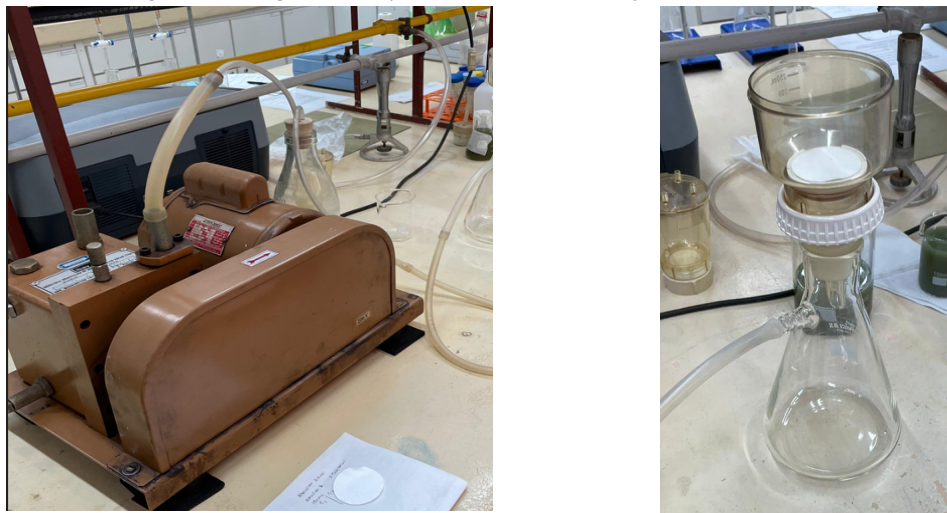
3.3 Equipamentos utilizados

- Centrífuga de bancada (Thermo, modelo Legend XFR), utilizada para o pré-tratamento das amostras.
- Sistema de microfiltração em escala de bancada, com suporte para filtros de 3,5 cm de diâmetro, conforme Figura 3.
- Membranas de microfiltração em fibra de vidro (Glass Microfiber Filters, Ahlstrom), com abertura nominal < 1,0 µm.
- Espectrofotômetro DR2010 (Hach).
- Turbidímetro Hach 2100P.

- pHmetro digital.

A Figura 1 mostra o experimento de microfiltração em escala de bancada.

Figura 1 – Fotografia do experimento de Microfiltração em escala de bancada.



Fonte: Autor (2025).

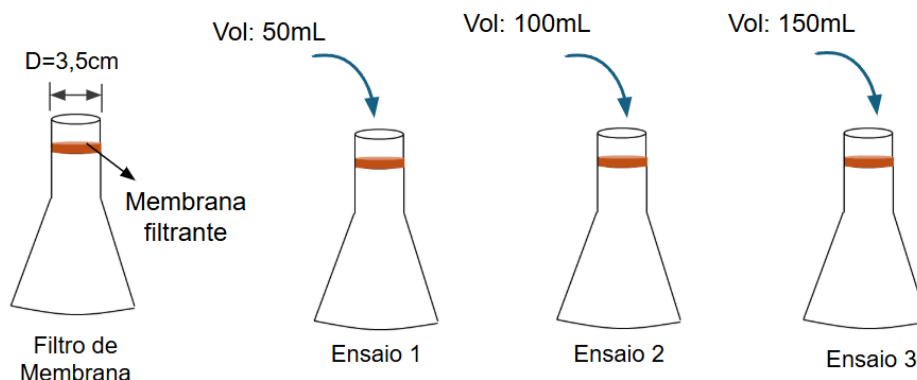
3.4 Procedimentos experimentais

As amostras de efluente bruto foram inicialmente analisadas diretamente para determinação de cor, turbidez e pH, em triplicata. Em seguida, uma alíquota do efluente bruto foi submetida à centrifugação em bancada, sendo o sobrenadante caracterizado nos mesmos parâmetros, também em triplicata. Posteriormente, alíquotas do efluente bruto foram submetidas à microfiltração utilizando membranas novas para cada ensaio, com a realização de três experimentos sucessivos correspondentes às passagens de 50, 100 e 150 mL. Ao final de cada ensaio, foram determinadas cor, turbidez e pH, sempre em triplicata.

Finalmente, a amostra previamente centrifugada foi submetida à microfiltração em duas condições: na primeira, com membrana nova, realizou-se a passagem de 50 mL e subsequente análise em triplicata; na segunda, utilizando a mesma membrana já empregada no ensaio anterior (reutilizada), foi realizada a passagem de mais 50 mL, seguida igualmente de análises em triplicata.

A Figura 2 ilustra o esquema dos ensaios realizados com o efluente bruto.

Figura 2 – Esquema dos ensaios realizados com o efluente bruto.

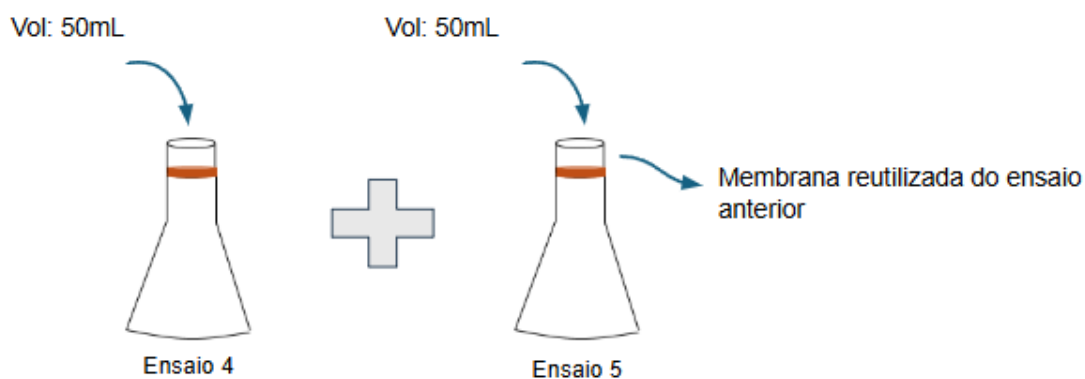


Fonte: Autor (2025).

Inicialmente, no ensaio 4 foram passados 50 mL de amostra através de uma membrana nova, seguido da análise de cor, turbidez e pH, em triplicata. Em seguida, a mesma membrana foi reutilizada para a passagem de mais 50 mL de amostra referente ao ensaio 5, sendo realizado novamente em triplicata.

A Figura 3 ilustra o esquema dos ensaios realizados com o efluente centrifugado.

Figura 3 – Esquema dos ensaios realizados com o efluente centrifugado.



Fonte: Autor (2025).

A origem do efluente utilizado, a sigla e os volumes das amostras de cada um dos 5 (cinco) ensaios estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo dos 5 (cinco) ensaios realizados, com origem do efluente, sigla e volume de amostra utilizada em cada ensaio.

Ensaio	Efluente (origem)	Sigla	Volume amostra (mL)
1	Bruto	EB	50
2	Bruto	EB	100
3	Bruto	EB	150
4	Centrifugado	EC	50
5	Centrifugado	EC	50+50

Fonte: Autor (2025).

3.5 Correções por diluição

Para alguns ensaios, devido aos elevados valores de cor e turbidez, foi necessário realizar diluições prévias. Os valores finais foram corrigidos com base no fator de diluição aplicado.

3.6 Tratamento dos dados

Os resultados obtidos foram organizados em tabelas, apresentando valores médios e desvios-padrão das triplicatas. Quando aplicável, os dados foram comparados com valores da literatura. Gráficos comparativos foram construídos para melhor visualização do desempenho de cada etapa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do efluente bruto

A caracterização inicial do efluente CIP bruto confirmou seu elevado impacto ambiental potencial. A cor aparente média foi de $10.487 \pm 166,5$ Pt-Co e a turbidez de $2.440 \pm 22,9$ NTU, ambas determinadas em triplicata. O pH manteve-se constante em 13,0 em todas as medições. Os valores obtidos a partir da caracterização da cor e turbidez do efluente bruto estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados da caracterização da cor e turbidez do efluente bruto.

Parâmetro	Repetição	Leitura (Pt-Co)	Resultado final (Pt-Co)	Diluição	
				Amostra bruta (mL)	Água destilada (mL)
Cor	1°	527	10.540	10	200
	2°	531	10.620	10	200
	3°	515	10.300	10	200
	Média	524	10.487	-	-
	Desvio Padrão	8,3	166,5	-	-

Parâmetro	Repetição	Leitura (NTU)	Resultado final (NTU)	Diluição	
				Amostra bruta (mL)	Água destilada (mL)
Turbidez	1°	164	2.460	10	150
	2°	163	2.445	10	150
	3°	161	2.415	10	150
	Média	162,7	2.440	-	-
	Desvio Padrão	1,5	22,9	-	-

Fonte: Autor (2025).

Esses resultados evidenciam a alta carga de sólidos suspensos e compostos solúveis presentes no efluente proveniente da etapa de higienização da cervejaria, inviabilizando qualquer possibilidade de reúso direto sem tratamento prévio.

4.2 Caracterização do efluente centrifugado

Após a centrifugação, houve remoções expressivas nos parâmetros avaliados. A cor reduziu para $1.917 \pm 25,2$ Pt-Co e a turbidez para $116 \pm 2,1$ NTU, representando diminuição de aproximadamente 82% e 95%, respectivamente, em comparação à amostra bruta. O pH permaneceu estável em 13,0. Os resultados da caracterização da cor e turbidez do efluente centrifugado estão dispostas na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados da caracterização da cor e turbidez do efluente centrifugado.

Parâmetro	Repetição	Leitura (Pt-Co)	Resultado final (Pt-Co)	Diluição	
				Amostra bruta (mL)	Água destilada (mL)
Cor	1°	194	1.940	5	50
	2°	192	1.920	5	50
	3°	189	1.890	5	50
	Média	192	1.917		
	Desvio Padrão	2,5	25,2		

Parâmetro	Repetição	Resultado final (NTU)
Turbidez ⁽¹⁾	1°	118
	2°	117
	3°	114
	Média	116
	Desvio Padrão	2,1

⁽¹⁾Nota: não foram realizadas diluições para turbidez.

Fonte: Autor (2025).

Os resultados obtidos confirmam a centrifugação como etapa preliminar eficiente, assegurando significativa remoção de sólidos suspensos. Essa redução da carga particulada foi determinante para a viabilização da etapa subsequente de microfiltração.

4.3 Microfiltração da amostra bruta

Nas Tabelas 5 a 7 tem-se os resultados da microfiltração dos Ensaios 1, 2 e 3, com volumes de amostras de 50mL, 100mL e 150mL, respectivamente.

Tabela 5 – Resultados da microfiltração do efluente bruto no Ensaio 1 (50 mL).

Parâmetro	Repetição	Leitura (Pt-Co)	Resultado final (Pt-Co)	Diluição	
				Amostra bruta (mL)	Água destilada (mL)
Cor		390	7.800	5	100
	1 (50 mL)	383	7.660	5	100
		386	7.720	5	100
	Média	386	7.727		
	Desvio Padrão	3,5	70,2		-
Parâmetro	Repetição	Leitura (NTU)	Resultado final (NTU)	Diluição	
				Amostra bruta (mL)	Água destilada (mL)
Turbidez		185	1.850	5	50
	1 (50 mL)	189	1.890	5	50
		182	1.820	5	50
	Média	185	1.853		
	Desvio Padrão	3,5	35,1		-

Fonte: Autor (2025).

Tabela 6 – Resultados da microfiltração do efluente bruto no Ensaio 2 (100 mL).

Parâmetro	Repetição	Leitura (Pt-Co)	Resultado final (Pt-Co)	Diluição	
				Amostra bruta (mL)	Água destilada (mL)
Cor		437	8.740	5	100
	2 (100 mL)	433	8.660	5	100
		433	8.660	5	100
	Média	434	8.687		
	Desvio Padrão	2,3	46,2		-
Parâmetro	Repetição	Leitura (NTU)	Resultado final (NTU)	Diluição	
				Amostra bruta (mL)	Água destilada (mL)
Turbidez		203	2.030	5	50
	2 (100 mL)	195	1.950	5	50
		195	1.960	5	50
	Média	198	1.980		
	Desvio Padrão	4,4	43,6		-

Fonte: Autor (2025).

Tabela 7 – Resultados da microfiltração do efluente bruto no Ensaio 3 (150 mL).

Parâmetro	Repetição	Leitura (Pt-Co)	Resultado final (Pt-Co)	Diluição	
				Amostra bruta (mL)	Água destilada (mL)
Cor	3 (150 mL)	455	13.650	5	150
		452	13.560	5	150
		457	13.710	5	150
	Média	455	13.640		
	Desvio Padrão	2,5	75,5		-

Parâmetro	Repetição	Leitura (NTU)	Resultado final (NTU)	Diluição	
				Amostra bruta (mL)	Água destilada (mL)
Turbidez	3 (150 mL)	209	2.090	5	50
		205	2.050	5	50
		201	2.010	5	50
	Média	205	2.050		
	Desvio Padrão	4,0	40,0		-

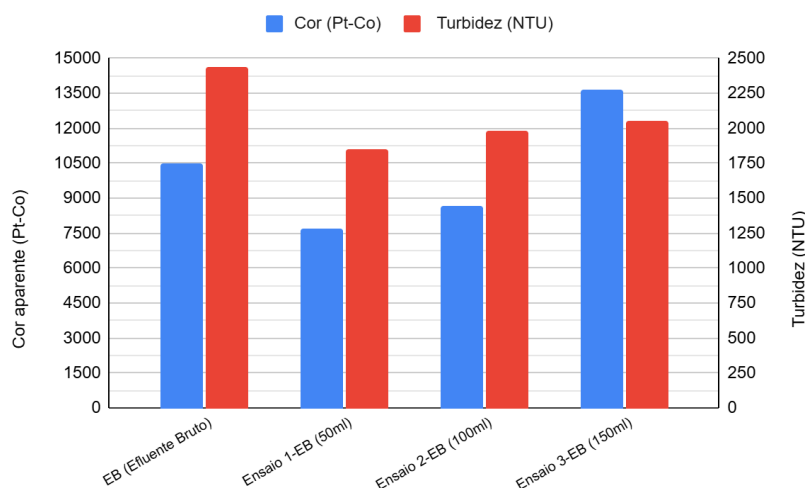
Fonte: Autor (2025).

Para o Ensaio 1, com volume inicial de 50 mL, observou-se remoção parcial, com valores médios de 7.727 ± 70 Pt-Co para cor e 1.853 ± 35 NTU para turbidez. Entretanto, à medida que volumes maiores foram processados, houve aumento progressivo dos parâmetros, atingindo 13.640 ± 75 Pt-Co de cor e 2.050 ± 40 NTU de turbidez na passagem de 150 mL.

Esse comportamento indica rápida colmatção (fouling) das membranas em contato direto com o efluente bruto, comprometendo sua eficiência. Fenômenos semelhantes foram relatados por Stephanie do Carmo et al. (2017), no tratamento de água produzida de petróleo, e por Rafael (2010), em estudo com membranas cerâmicas de microfiltração, ambos destacando o entupimento precoce dos poros da membrana.

A Figura 4 apresenta os resultados dos 3 (três) ensaios de microfiltração realizados com amostras de efluente bruto, mostrando os valores médios de cor e turbidez antes e após o tratamento.

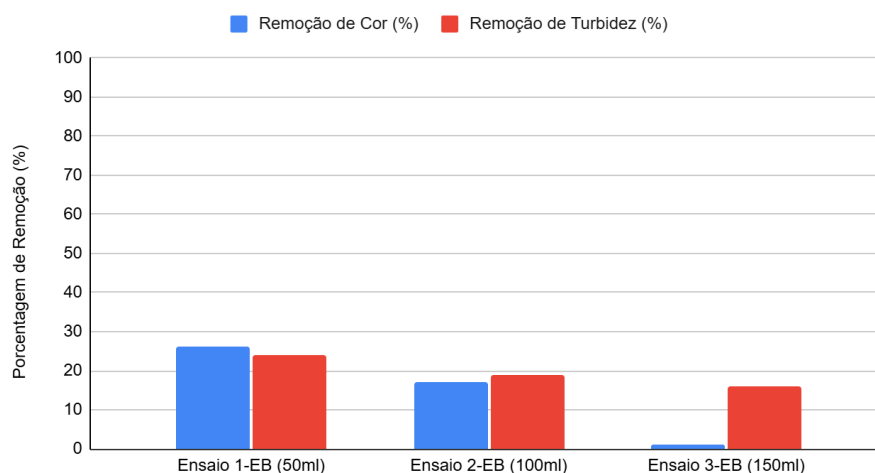
Figura 4 – Resultados da cor aparente (Pt-Co) e da turbidez (NTU) para o efluente bruto e após os três ensaios de microfiltração (50 mL, 100 mL e 150 mL).



Fonte: Autor (2025).

A Figura 5 apresenta o percentual de remoção de cor e turbidez obtido nos três ensaios de microfiltração com amostras de efluente bruto. Esse tipo de análise permite avaliar de forma comparativa a eficiência do processo em diferentes volumes tratados, destacando o efeito da colmatção progressiva das membranas à medida que maiores quantidades de efluente foram processadas.

Figura 5 - Redução percentual da cor aparente e turbidez do efluente bruto e dos 3 (três) ensaios de microfiltração.



Nota: Para o gráfico do ensaio 3-EB, foi atribuído o valor de 0 (zero) ao percentual de remoção de cor, em razão do transpasso de sólidos dissolvidos observado neste ensaio, o que comprometeu a eficiência do processo.

Fonte: Autor (2025).

Os resultados apresentados na Figura 5 evidenciam que a eficiência de remoção variou de acordo com o volume processado. No Ensaio 1-EB (50 mL), observou-se maior redução de cor ($\approx 25\%$) e turbidez ($\approx 23\%$), indicando que a membrana apresentou razoável desempenho inicial

em contato direto com o efluente bruto. Já no Ensaio 2-EB (100 mL), os percentuais caíram para valores próximos de 18% em ambos os parâmetros, sugerindo início do processo de colmatação (fouling).

No Ensaio 3-EB (150 mL), a remoção de cor foi nula (0%), devido ao transpasse de sólidos dissolvidos, enquanto a turbidez ainda apresentou redução de cerca de 17%.

Assim, conclui-se que a microfiltração aplicada diretamente ao efluente bruto apresentou desempenho limitado, principalmente em volumes maiores, devido à rápida colmatação da membrana.

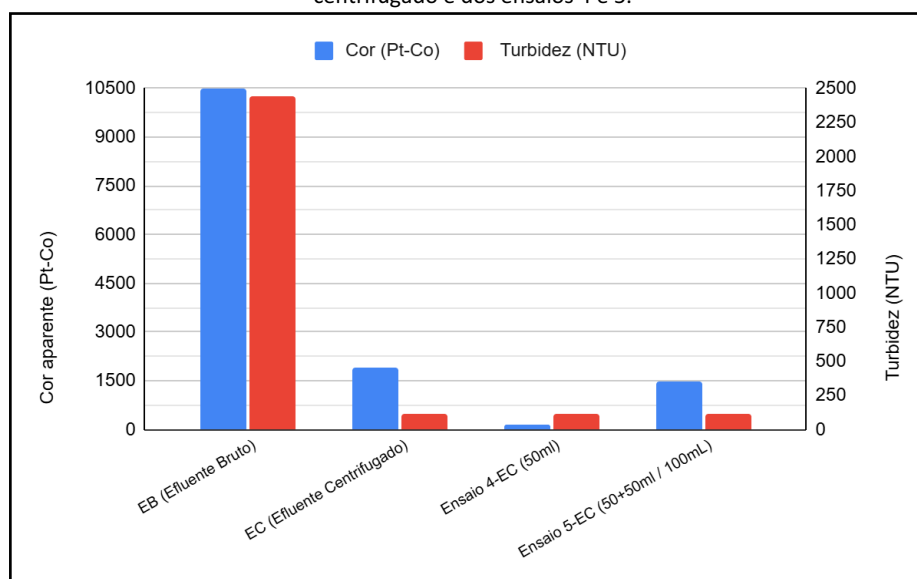
4.4 Microfiltração da amostra centrifugada

A microfiltração aplicada ao efluente previamente centrifugado apresentou os melhores resultados desta pesquisa. Com membrana nova e passagem de 50 mL, a cor foi reduzida para $128 \pm 2,5$ Pt-Co e a turbidez para $112 \pm 2,0$ NTU, valores que representam diminuição superior a 90% em relação à amostra bruta.

No reúso da mesma membrana (50 + 50 mL), observou-se aumento da cor para $1.463 \pm 15,3$ Pt-Co, enquanto a turbidez manteve-se praticamente estável em $111 \pm 2,1$ NTU. Esse comportamento caracteriza o efeito do fouling, em que compostos cromóforos se acumulam nos poros da membrana, reduzindo sua seletividade.

A Figura 6 apresenta os valores médios de cor aparente (Pt-Co) e turbidez (NTU) obtidos para o efluente bruto (EB), efluente centrifugado (EC) e efluente tratado após os Ensaios 4 e 5 de microfiltração com efluente centrifugado (EC).

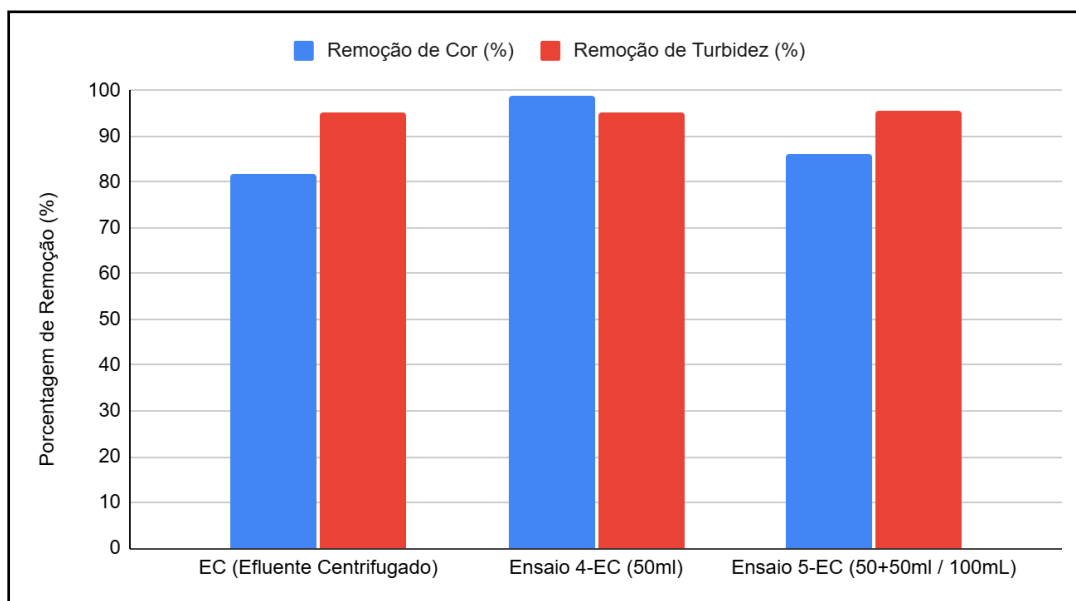
Figura 6 - Resultados dos valores de cor aparente (Pt-Co) e da turbidez (NTU) da amostra de efluente bruto, centrifugado e dos ensaios 4 e 5.



Fonte: Autor (2025).

Já a Figura 7 mostra o percentual de remoção de cor e turbidez para cada condição avaliada, na centrifugação e nos Ensaios 4 e 5, permitindo comparar a eficiência da centrifugação isolada e da microfiltração aplicada em sequência após a centrifugação do efluente bruto.

Figura 7 - Redução percentual da cor aparente e turbidez do efluente centrifugado e dos ensaios 4 e 5.



Fonte: Autor (2025).

4.5 Análise da centrifugação como pré tratamento

A centrifugação se mostrou uma etapa preliminar altamente eficiente no tratamento do efluente CIP bruto, reduzindo significativamente os parâmetros de qualidade analisados. Após o processo, a cor aparente diminuiu de $10.487 \pm 166,5$ Pt-Co para $1.917 \pm 25,2$ Pt-Co, correspondendo a uma remoção percentual de 82%. Da mesma forma, a turbidez foi reduzida de $2.440 \pm 22,9$ NTU para $116 \pm 2,1$ NTU, o que equivale a uma remoção de cerca de 95%

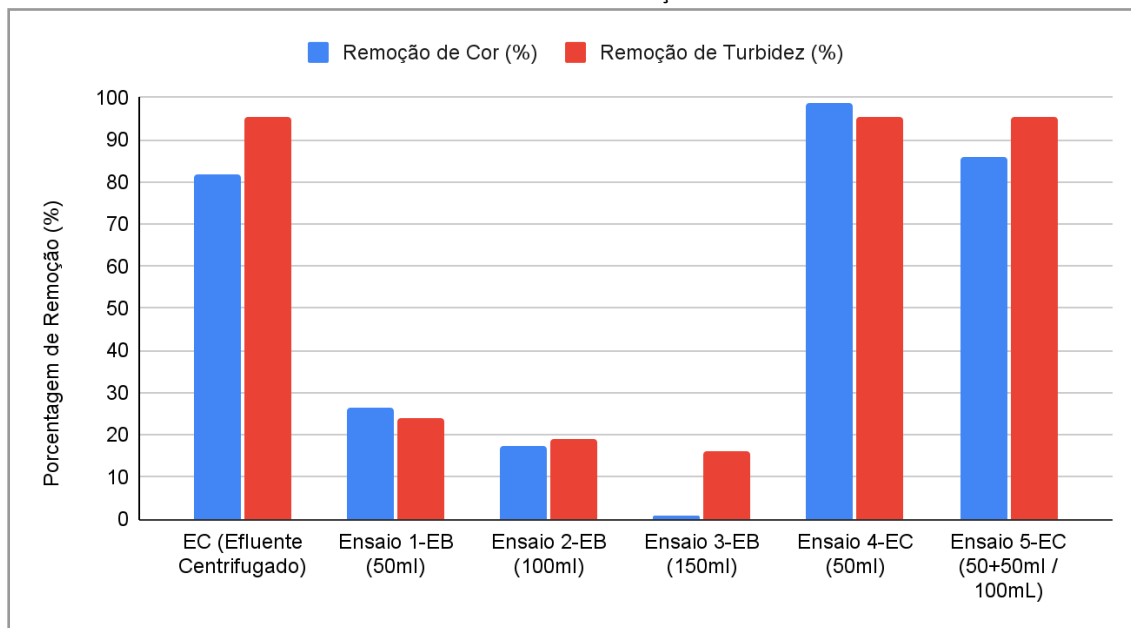
Esses resultados evidenciam que a centrifugação é capaz de reter grande parte dos sólidos suspensos e compostos particulados presentes no efluente, reduzindo de maneira expressiva a carga poluidora inicial. A queda substancial de turbidez reforça o papel da técnica na clarificação, uma vez que esse parâmetro está diretamente associado à presença de partículas em suspensão.

Além disso, a diminuição acentuada de cor já na etapa de centrifugação demonstra que parte dos compostos cromóforos encontra-se associada à fração particulada removida. Essa condição é fundamental para viabilizar a microfiltração subsequente, uma vez que a redução da carga de sólidos diminui a probabilidade de colmatção rápida das membranas.

Portanto, os resultados obtidos confirmam que a centrifugação não apenas melhora a qualidade inicial do efluente, mas também atua como pré-tratamento indispensável, assegurando maior eficiência e durabilidade da etapa de microfiltração.

Os resultados da remoção percentual da cor aparente e turbidez do efluente centrifugado e dos 5 (cinco) ensaios de microfiltração realizados estão dispostos na Figura 8.

Figura 8 - Resultados da remoção percentual da cor aparente e turbidez do efluente centrifugado e dos 5 (cinco) ensaios de microfiltração.



Fonte: Autor (2025).

4.6 Discussão geral dos resultados baseado na literatura

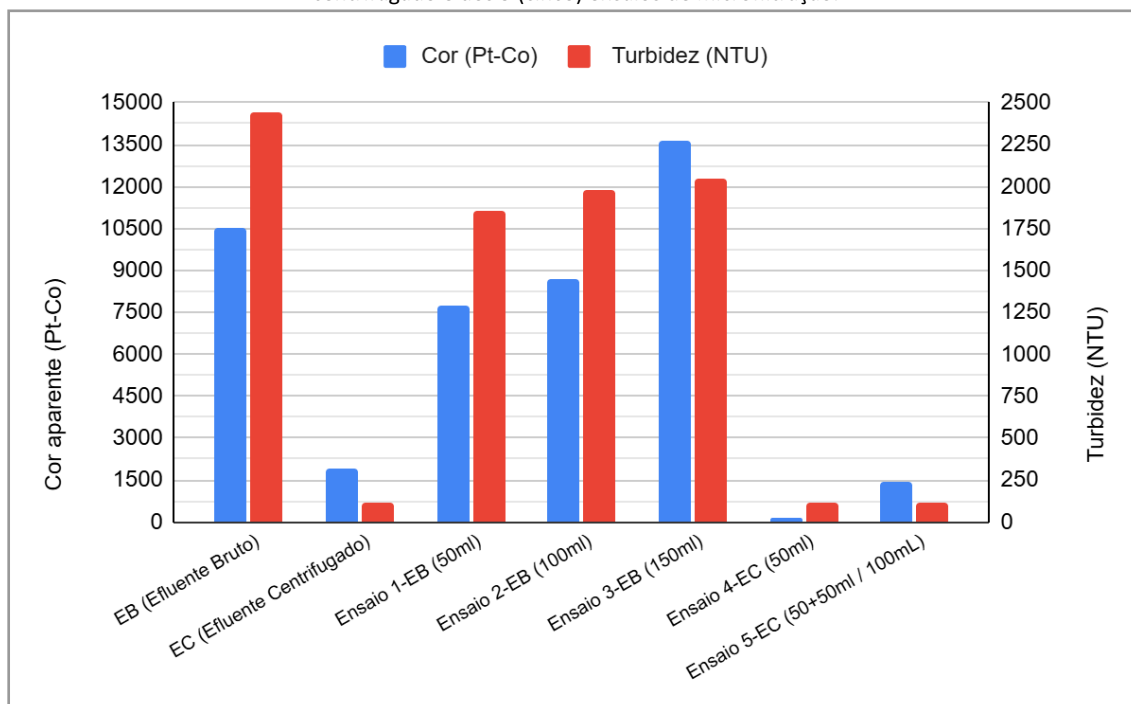
Os resultados obtidos demonstraram que o uso combinado de centrifugação e microfiltração é uma alternativa eficiente para o tratamento do efluente CIP. A centrifugação promoveu redução significativa de sólidos suspensos, melhorando a claridade da amostra e reduzindo a propensão ao entupimento das membranas — comportamento coerente com estudos sobre o papel do pré-tratamento na mitigação de fouling (DEVASY et al., 2023).

A microfiltração aplicada diretamente ao efluente bruto apresentou desempenho limitado, devido à colmatção precoce das membranas. Entretanto, quando aplicada ao efluente previamente centrifugado, houve aumento expressivo na eficiência, com redução superior a 90 % na cor e cerca de 95 % na turbidez, mantendo o pH próximo de 13. Esses resultados são compatíveis com os observados por EZUGBE & RATHILAL (2020), que destacam o potencial dos processos de membranas para remoção de sólidos e polimento de efluentes industriais, especialmente em águas alcalinas.

Além disso, a manutenção da alcalinidade indica a possibilidade de reaproveitamento parcial da soda cáustica residual, prática já descrita em processos industriais para redução de custos de reagentes e diminuição da carga poluente (KATO et al., 2024). A combinação entre centrifugação e microfiltração, portanto, apresenta potencial não apenas para o reúso de água, mas também para o aproveitamento químico, reforçando seu papel como estratégia de sustentabilidade e economia circular.

A Figura 9 mostra os valores de cor aparente (Pt-Co) e turbidez (NTU) da amostra de efluente bruto, centrifugado e dos 5 (cinco) ensaios de microfiltração.

Figura 9 - Resultados dos valores de cor aparente (Pt-Co) e turbidez (NTU) da amostra de efluente bruto, centrifugado e dos 5 (cinco) ensaios de microfiltração.



Fonte: Autor (2025).

5 CONCLUSÕES

O efluente CIP bruto apresentou valores elevados de cor (10.487 Pt-Co) e turbidez (2.440 NTU), inviabilizando seu reúso direto.

A centrifugação mostrou-se altamente eficiente como etapa preliminar, promovendo reduções de aproximadamente 82% na cor e 95% na turbidez, sem alteração significativa no pH, evidenciando sua relevância como pré-tratamento indispensável.

A microfiltração aplicada diretamente ao efluente bruto não demonstrou viabilidade devido à rápida colmatação das membranas, especialmente em maiores volumes. Em contrapartida, a microfiltração associada à centrifugação potencializou a eficiência do processo, alcançando reduções superiores a 85% na cor e 95% na turbidez, configurando-se como alternativa promissora para o polimento do efluente CIP.

O reúso de membranas evidenciou perda de desempenho, sobretudo na remoção de cor, confirmando o efeito de fouling e reforçando a necessidade de protocolos de limpeza ou substituição periódica.

Conclui-se que a integração entre centrifugação e microfiltração constitui uma estratégia eficaz para a clarificação do efluente CIP, viabilizando seu reúso em aplicações não potáveis e contribuindo para práticas mais sustentáveis na indústria cervejeira.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. Washington: APHA/AWWA/WEF, 2012.

DEVASY, S. et al. Membranes in Water Reclamation: Treatment, Reuse and Concentrate Management. **Membranes**, Basel, v. 13, n. 6, p. 605, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0375/13/6/605>. Acesso em: 24 out. 2025.

EZUGBE, E. O.; RATHILAL, S. Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A Review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Basel, v. 10, n. 5, p. 89, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0375/10/5/89>. Acesso em: 24 out. 2025.

KATO, S. et al. Comprehensive review of industrial wastewater treatment technologies. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-024-34584-0>. Acesso em: 25 out. 2025.

STEFFEN, Stephanie Fernanda. **Tratamento de água produzida de petróleo utilizando microfiltração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

TRINDADE, Rafael Scheer. **Caracterização de membranas poliméricas aplicadas ao processo de microfiltração**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

Ao descrever a participação de cada autor no manuscrito, utilize os seguintes critérios:

- **Concepção e Design do Estudo:** Profa. Dra. Cali Laguna Achon.
- **Curadoria de Dados:** Profa. Dra. Cali Laguna Achon.
- **Análise Formal:** Vitor Mauri Marcos.
- **Aquisição de Financiamento:** Profa. Dra. Cali Laguna Achon.
- **Investigação:** Vitor Mauri Marcos.
- **Metodologia:** Vitor Mauri Marcos.
- **Redação - Rascunho Inicial:** Vitor Mauri Marcos.
- **Redação - Revisão Crítica:** Vitor Mauri Marcos.
- **Revisão e Edição Final:** Vitor Mauri Marcos.
- **Supervisão:** Profa. Dra. Cali Laguna Achon.

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Eu, **Vitor Mauri Marcos**, e **Profa. Dra. Cali Laguna Achon**, declaramos que o manuscrito intitulado

“Tratamento de efluente industrial por meio de microfiltração em escala de bancada visando reuso de água”

não apresenta conflitos de interesse de natureza financeira, profissional ou pessoal que possam influenciar os resultados deste estudo.

1. **Vínculos Financeiros:** Este trabalho contou com apoio financeiro da EMBRAPPII – Materiais UFSCar. A instituição financiadora não teve influência sobre o desenho experimental, coleta, análise ou interpretação dos dados.
 2. **Relações Profissionais:** O trabalho foi desenvolvido no âmbito da Iniciação Científica da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), sob orientação da Profa. Dra. Cali Laguna Achon. Nenhuma relação profissional relevante ao conteúdo deste manuscrito foi estabelecida.
 3. **Conflitos Pessoais:** Não possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito.
-