

Comparison of the performance of membrane bioreactors and nanofiltration in the treatment of textile wastewater: a systematic review

Abstract– The textile industry is one of the main industrial sectors contributing to the generation of wastewater with a high pollutant load. This activity has therefore driven the development of new technologies that are more efficient in treating this type of wastewater. This systematic review aims to compare the effectiveness of membrane bioreactors (MBR) and nanofiltration (NF), focusing on the efficiency of removing various pollutants and the warmth of the treated water. To this end, a search strategy based on the PICO approach was applied, using the Scopus, SciELO and PubMed databases, from which 358 articles were selected up to March 2025, of which 53 articles were selected after applying the inclusion and exclusion criteria. The results obtained show that MBR is more efficient in removing organic matter and synthetic dyes, while NF performs better against heavy metals and salts. Both methods have demonstrated that the quality of the treated water meets environmental standards, but their application will depend on the type of predominant contaminant and the operating conditions. This research provides a comprehensive and comparative overview of the two technologies used in textile effluent treatment and suggests that integrating the two could be an effective alternative in various industrial settings.

Keywords-- Wastewater treatment, textile industry, membrane bioreactor, nanofiltration, contaminant removal

Comparación del desempeño del biorreactor de membranas y nanofiltración en el tratamiento de aguas residuales textiles: una revisión sistemática

0000-0002-6340-2678¹; 0009-0001-2161-5587²; 0009-0004-9803-5742³; 0000-0003-1218-3986⁴

Alfredo Manuel Canaza Masco¹; Mariajose Gamio-Delgado²; Nayely Tamayo-Vega³; Santos Elmer Llerena Escobar⁴

¹⁻⁴ Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa, Perú

acanaza@utp.edu.pe, U21220750@utp.edu.pe, U20242489@utp.edu.pe, sllerena@utp.edu.pe

Resumen– La industria textil es uno de los principales sectores industriales que contribuyen a la generación de aguas residuales, con una alta carga contaminante, por lo que esta actividad ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías que tienen una mayor eficiencia para el tratamiento de estas. Esta revisión sistemática tiene como objetivo comparar la efectividad del biorreactor de membrana (MBR) y la nanofiltración (NF), centrando el estudio en la eficiencia de eliminación de diversos contaminantes y la calidez del agua tratada. Para ello se aplicó una estrategia de búsqueda basada en el enfoque PICO, para lo cual se utilizaron las bases de datos Scopus, SciELO y PubMed, en las cuales se obtuvieron 358 artículos seleccionados, hasta marzo de 2025, de los cuales 53 artículos fueron seleccionados luego de aplicar los criterios de inclusión y exclusión. Los resultados obtenidos muestran que el MBR es más eficiente en cuanto a remoción de materia orgánica y colorantes sintéticos, mientras que el NF presenta mejores resultados contra metales pesados y sales, por lo que ambos métodos han demostrado que la calidad del agua tratada se obtiene de acuerdo a estándares ambientales, pero la aplicación de estos dependerá del tipo de contaminante predominante y de las condiciones de operación. Esta investigación puede proporcionar una visión panorámica y comparativa de las dos tecnologías en el tratamiento de efluentes textiles y sugiere que la integración de las dos podría representar una alternativa eficaz en diversos escenarios industriales.

Palabras clave– Tratamiento de aguas residuales, industria textil, biorreactor de membrana, nanofiltración, eliminación de contaminantes

I. INTRODUCCIÓN

La industria textil es una de las más importantes a nivel mundial, considerando también que es una de las mayores generadoras de las aguas residuales en la industria textil. Ya que dichas aguas contienen una gran variedad de contaminantes, incluyendo así los colorantes sintéticos, los compuestos orgánicos refractarios, tensioactivos, metales pesados y las altas concentraciones de sales [1]. Durante los últimos años, se han desarrollado diversas tecnologías para así poder mejorar el tratamiento de estos efluentes. Como resultado, se observa que las tecnologías más destacadas en la industria textil son las tecnologías de membranas, especialmente los biorreactores de membrana (MBR), ya que estos integran los procesos biológicos y la separación física, mientras que la nanofiltración (NF), es una tecnología de separación por presión que permite la retención de moléculas

de tamaño medio, como los colorantes y las sales [2]. De este modo, ambos métodos han demostrado eficiencia en los diversos escenarios industriales textiles, y, por ende, han recibido una atención creciente en el campo del tratamiento de las aguas residuales textiles [3].

Aunque existen múltiples estudios sobre el uso del MBR y la NF en el tratamiento de las aguas residuales textiles, se puede destacar que la mayoría de los estudios encontrados, lo analizan de una manera individual [4]. Por lo que esto ha generado una falta de revisiones sistemáticas que comparen directamente el desempeño de ambas tecnologías en términos de eficiencia, condición operativa, aplicaciones específicas, consumo energético y capacidad de tratamiento. Además, cabe destacar los diferentes resultados presentados en las diversas fuentes encontradas, ya que dichos resultados no están sujetos en las mismas condiciones experimentales. En consecuencia, no se cuenta con una visión panorámica ni organizada que permita identificar de manera clara y precisa cuál de estas dos tecnologías es más adecuada para los diversos contextos industriales textiles. De modo que, esta ausencia de comparación estructurada en las diversas investigaciones representa un vacío en la literatura científica actual.

Por consiguiente, la presente revisión sistemática surge de la necesidad de reunir y comparar de forma ordenada la información disponible sobre el uso del MBR y la NF en el tratamiento de las aguas residuales textiles. Dicho análisis no solo permitirá contrastar sus ventajas y limitaciones desde una perspectiva técnica, sino que también, nos aportará conocimiento útil para así orientar futuras decisiones en la selección de las tecnologías apropiadas en la industria textil, especialmente en contextos donde se busca reducir el impacto ambiental. En definitiva, no se han identificado revisiones recientes que aborden esta comparación de manera integral, por lo que esta RSL representa un aporte relevante tanto para el ámbito académico como para el sector industrial [5].

El objetivo de esta RSL es poder analizar comparativamente el desempeño del biorreactor de membranas y la nanofiltración en el tratamiento de las aguas residuales textiles, con un realce en su eficiencia de remoción de los contaminantes y en la calidad final del agua tratada, de acuerdo con la evidencia científica publicada entre los años 2014 e inicios del 2025.

El presente trabajo se organiza en cinco secciones. En la sección 1, introducción, se presenta el contexto de la problemática, la justificación del estudio y el vacío del conocimiento existente en la literature; la sección 2, metodología, detalla el proceso de búsqueda sistemática bajo el enfoque PICO, así como la presentación de los criterios de inclusión y exclusión aplicados; la sección 3, resultados, donde se expone los principales hallazgos obtenidos, organizados por tipo de contaminantes tratados, parámetros físico-químicos del agua, eficiencia de remoción, condiciones operativas, ventajas y limitaciones; la sección 4, discusión, donde se interpretan estos resultados, destacando así las diferencias entre MBR y NF, así como las oportunidades de mejora y líneas futuras de investigación; finalmente, la sección 5, conclusiones, donde se encuentra el resume de los hallazgos más relevantes encontrados y también sugiere recomendaciones para futuros estudios en el campo del tratamiento de aguas residuales textiles.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló bajo el enfoque de una Revisión Sistemática de Literatura sin metaanálisis, que se realizó a través de estrategias de búsqueda PICO, y la selección de artículos bajo usando el diagrama PRISMA.

A. Estrategia de búsqueda

La presente investigación se enmarca dentro de una RSL, donde a partir de dicho objetivo, se formula la siguiente pregunta principal de investigación: ¿Qué tan efectivas son las aplicaciones del biorreactor de membranas y la nanofiltración en el tratamiento de las aguas residuales en la industria textil, considerando su eficiencia de remoción de los contaminantes y la calidad del agua tratada? A partir de esta pregunta, se estructuró la estrategia de búsqueda mediante el enfoque PICO, identificando así los componentes y las palabras claves asociadas. Estos elementos se presentan en la Tabla I.

TABLA I
COMPONENTES DEL MODELO PICO Y PALABRAS CLAVE ASOCIADAS

Componentes	Descripción	Palabras clave
P – Problema	Aguas residuales de la industria textil	"Textile wastewater" OR "textile effluents" OR "industrial wastewater" OR "textile industry"
I – Intervención	Aplicación del biorreactor de membrana y nanofiltración	"Membrane bioreactor" OR MBR OR nanofiltration OR NF
O – Resultados	Eficiencia de remoción de contaminantes y calidad del agua tratada	"Contaminant removal" OR "pollutant removal" OR "treatment efficiency" OR "water quality"

A partir de la pregunta principal mencionada anteriormente, se plantearon las siguientes preguntas complementarias específicas, las cuales son: ¿Qué características presentan las aguas residuales generadas en la industria textil y qué compuestos contaminantes son los más comunes en dichos efluentes?, ¿Cuáles son los beneficios y limitaciones que ofrece el uso de los biorreactores de

membrana y la nanofiltración en el tratamiento de las aguas residuales textiles? y ¿Qué diferencias presentan los sistemas MBR y NF en términos de eficiencia de remoción de los contaminantes y la calidad final del agua tratada en la industria textil?

B. Ecuación de búsqueda

La búsqueda sistemática se llevó a cabo en la base de datos Scopus, empleando la siguiente ecuación de búsqueda:

TITLE-ABS-KEY (("textile wastewater" OR "textile effluents" OR "industrial wastewater" OR "textile industry") AND ("membrane bioreactor" OR MBR OR nanofiltration OR NF) AND ("contaminant removal" OR "pollutant removal" OR "treatment efficiency" OR "water quality"))

Y para la búsqueda de más información se utilizó otras dos bases de datos que son SciELO y PubMed, se utilizó la siguiente ecuación: "textile wastewater" AND "membrane bioreactor" AND "nanofiltration"

C. Criterios de inclusión y exclusión

Para garantizar la pertinencia y la calidad de los estudios seleccionados en esta RSL, se establecieron criterios de inclusión (CI) y criterios de exclusión (CE) claramente definidos, por lo tanto, los criterios de inclusión fueron los siguientes:

1) Criterio de inclusión (CI)

CI1: El estudio debe abordar el tratamiento de las aguas residuales textiles

CI2: El estudio debe aplicar o evaluar la tecnología de MBR y la NF.

CI3: El estudio debe reportar resultados relacionados con la eficiencia de remoción de contaminantes y la calidad del agua tratada.

2) Criterio de exclusión (CE)

CE1: Estudios que no presenten datos, resultados o análisis de desempeño y no tengan relación con el MBR y la NF.

CE2: Estudios que no se enfocan específicamente en el sector textil como contexto principal de la aplicación.

CE3: Tipo de publicación que no corresponde a los artículo original (Tesis, capítulos de libros, informes técnicos).

CE4: Estudios que han sido publicaciones en idiomas distintos del español o inglés.

CE5: Documentos que son libros de texto universitario, material no indexado.

CE6: Estudios publicados antes del año 2014.

D. Proceso de selección de estudios

La búsqueda sistemática se realizó en tres bases de datos: Scopus, SciELO y PubMed. De lo cual, como resultado se identificaron 313 artículos en Scopus y 45 artículos adicionales en las otras dos bases de datos SciELO 9, PubMed

10 y Scopus26 (Estos documentos fueron identificados manualmente en Scopus y se presentan como material complementario a la revisión principal), obteniendo así un total de 358 artículos. A continuación, para la selección de los estudios relevantes, se aplicó la metodología PRISMA, dicha metodología permitió organizar y reportar de una

manera estructurada el proceso de inclusión y exclusión de los diversos artículos seleccionados.

En una primera etapa, se eliminaron 8 documentos duplicados. Posteriormente, se revisaron los títulos, resúmenes y las palabras clave, lo que llevó a la exclusión de 278 documentos por no cumplir con los criterios establecidos anteriormente. De ellos, 130 artículos fueron excluidos por CE1, 37 por CE2, 7 por CE4 y 104 por CE5. Como resultado, se seleccionaron un total de 72 artículos para excluir los documentos no recuperados a texto completo, con un total de 19 artículos que no se pudieron descargar. Posteriormente, se evaluaron los estudios a texto completo, tras esta última revisión, no se eliminaron documentos adicionales, ya que todos cumplían con los criterios establecidos. Finalmente se incluyeron 53 artículos en la revisión sistemática. A continuación, el proceso completo se resume gráficamente en el diagrama de flujo PRISMA como se muestra en la Fig. 1.

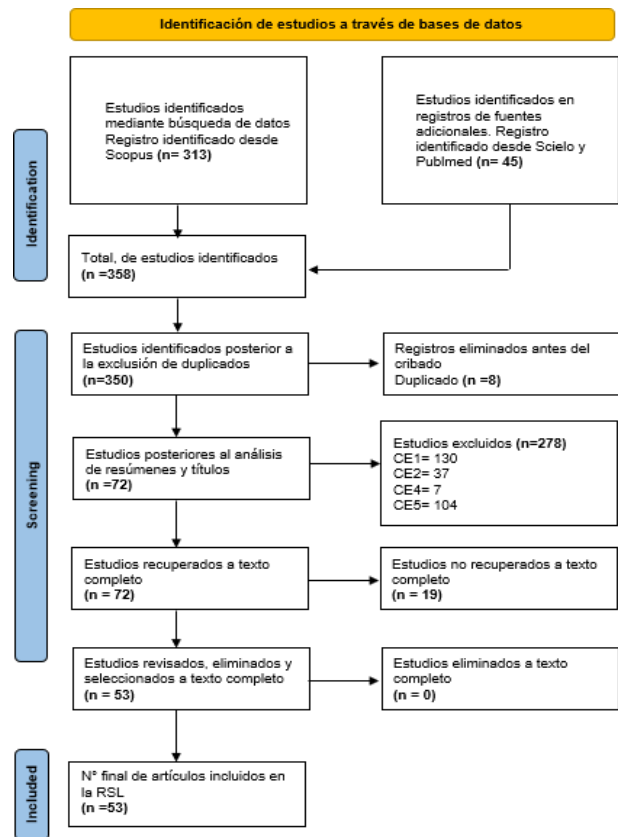


Fig. 1 Diagrama PRISMA, proceso de selección y filtrado de los estudios incluidos en la investigación.

III. RESULTADOS

La industria textil, al ser una de las mayores generadoras de aguas residuales industriales, ha motivado un notable incremento en el desarrollo e implementación de las tecnologías para el tratamiento de estos efluentes. Entre los más importantes destacan el MBR y la NF, ya que se reconocen por su eficacia en la remoción de los

contaminantes, por lo que dichas tecnologías se han investigado en la última década, y presentan diversas diferencias en términos de eficiencia, condiciones operativas y calidad del efluente. Por ello, con esta revisión se identificaron las tendencias y patrones clave para así aplicar el MBR y la NF en el contexto del tratamiento de las aguas residuales en la industria textil.

A. Distribución cronológica de publicaciones

El análisis cronológico permitió examinar la distribución de los 53 artículos seleccionados, agrupados según el año de publicación desde el año 2014 a inicios del 2025, como se muestra en la Figura 2. De modo que permite identificar los periodos con una mayor producción científica y así analizar el crecimiento del conocimiento en torno a las tecnologías evaluadas.



Fig. 2 Análisis por año de publicación

Donde, se puede evidenciar que en el año 2015 representa el punto más alto de elaboración, con un total de 9 artículos, lo que equivale aproximadamente al 16.36 % del total de los artículos incluidos. Seguido a eso siguen los años 2014, 2016, 2020 y 2024, cada uno con 8 o 7 publicaciones, lo que demuestra una continuidad del interés académico.

B. Origen geográfico de los estudios



Fig. 3 Análisis por país

Se examinó la procedencia geográfica, donde el enfoque permitió identificar los países que han mostrado una mayor producción científica, como se puede evidencia en la Fig. 3, el país con el mayor número de publicaciones fue Estados Unidos, con un total de 9 artículos, lo que evidencia un papel activo en el desarrollo e investigación de estas tecnologías ambientales. Seguido a eso Alemania y España con 8 y 6 artículos correspondientemente, lo que indica que dichos países tienen

una sólida inversión en investigación y desarrollo con una clara orientación hacia la búsqueda de soluciones tecnológicas

C. Contaminantes frecuentes en las aguas residuales textiles

Las aguas residuales en la industria textil están compuestas por diversos contaminantes, cuya presencia y concentración varían de acuerdo con los diversos procesos empleados en la fabricación y el tratamiento de los productos textiles, por lo tanto, es importante identificar los diversos contaminantes y así poder implementar soluciones de tratamiento más efectivas. En la Tabla II, se muestran algunos de los principales contaminantes en la industria textil.

TABLA II
PRINCIPALES CONTAMINANTES

Conceptos	Contaminantes	Presencia (%)	Referencias
Colorantes	Colorantes sintéticos	100	[1 - 11], [15], [22], [36], [39], [42], [45], [47], [48], [49], [50], [51], [52]; [53]
Metales pesados	Plomo, cromo, cadmio, mercurio	100	[1 - 11], [15], [22], [36], [39], [42], [45], [47 - 53]
Compuestos orgánicos	Aceites, grasas Fenoles y tensioactivos	36.4	[1 - 8], [15], [22], [36], [39], [53]
Sal	Sales (NaCl, Kcal, etc.)	16.7	[1], [7], [9], [12], [25], [36], [39], [42], [51]
Toxinas	Formaldehído, Nonilfenol, y Aminas aromáticas	25.5	[1], [2], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [15], [22], [29], [32], [36], [45]
Dye	Reactive Red 120, Direct Blue 1, Acid Orange 7	14.5	[1], [5], [15], [24], [29], [34], [39], [43]

En la Tabla II se presentan los principales contaminantes identificados en las aguas residuales de la industria textil, según la revisión de los 53 artículos científicos. En primer lugar, se observa que los colorantes sintéticos y los metales pesados están presentes en el 100 % de los estudios revisados, lo que significa su alta prevalencia y preocupación en el sector textil, por otro lado, otros contaminantes como las toxinas del teñido (25.5 %), compuestos orgánicos persistentes (36.4 %) y sales (16.7 %) también son reportados con frecuencia, aunque en menor proporción, lo que nos indica que estos hallazgos son clave para así poder comprender el perfil contaminante de los diversos efluentes textiles y así poder orientar la selección tecnológica en su tratamiento correspondiente.

D. Ventajas y limitaciones del uso del MBR y NF

TABLA III
VENTAJAS EN MBR Y NF

Categoría	MBR (ventajas)	NF (ventajas)	Referencias
Eficiencia	Alta eficiencia en la remoción de los compuestos orgánicos	Eficacia en remoción de metales pesados, menor consumo energético	[5], [9], [45]
Condición operativa	Bueno con alta carga orgánica y baja concentración de sólidos	Ideal para aguas con alta concentración de sales y los metales	[2], [6], [8]
Aplicación específica	Tratamiento de las aguas residuales de la tintura y el lavado en la industria textil	Tratamiento de aguas residuales de la tintura, el lavado y la remoción de sales	[15], [22], [35]
Bajo consumo energético	Menor huella de carbono y bajo consumo de la energía	Bajo consumo energético que otros procesos de membranas	[10], [19], [25]
Capacidad de tratamiento	Alta capacidad para tratar grandes volúmenes de agua	Puede tratar concentraciones altas de los metales pesados	[18], [27], [36]

En el tratamiento de las aguas residuales textiles, las tecnologías de MBR y NF, han demostrado ser herramientas muy importantes para así poder mejorar la calidad del agua, por lo que se presentan dos tablas que detallan las ventajas Tabla III y desventajas Tabla IV. Se puede evidenciar que ambas tecnologías presentan fortalezas que permite responder a las diversas condiciones y objetivos. Por un lado, el MBR ha demostrado un mayor vigor frente a las aguas con alta carga orgánica y sólidos suspendidos, lo que esta tecnología la hace especialmente para los efluentes generados en etapas como la tintura y el enjuague [2], [6], [9]. Y por el otro lado la NF se destaca en la eliminación selectiva de los compuestos específicos como metales pesados y sales [8], [25], [36].

A continuación, en la Tabla IV se presentan las principales desventajas de las tecnologías MBR y NF, ya que se tienen algunas limitaciones que deben ser consideradas

TABLA IV
DESVENTAJAS EN MBR Y NF

Categoría	MBR (desventajas)	NF (desventajas)	Referencias
Eficiencia	Menor eficiencia con los contaminantes muy pequeños	Baja permeabilidad de membranas y acumulación de contaminantes	[12], [25], [30]
Condición operativa	Alto costo de la instalación y el mantenimiento	Costos de reemplazo de las membranas	[11], [19], [28]
Aplicación específica	Necesita limpieza periódica de las membranas	Membranas susceptibles a la acumulación de los contaminantes	[13], [24], [33]
Bajo consumo energético	Vida útil limitada debido a la acumulación de los fangos	Requiere de reemplazo frecuente de las membranas	[7], [15], [29]
Capacidad de tratamiento	Sensible a cambios en el pH y de otros parámetros	Sensible a condiciones de la presión elevada	[6], [14], [20]

Se puede observar que se enfrentan diversos retos operacionales, esto principalmente está relacionado con la gestión de las membranas, ya que el MBR como la NF requieren de procedimientos de limpieza y que los mantenimientos sean frecuentes, esto debido a la acumulación de los sólidos o los contaminantes, por lo que se elevan los costos operativos y se acorta la vida útil de los sistemas [11], [19], [24], [29]. Dicho fenómeno es más conocido como ensuciamiento o fouling, ya que es una de las principales limitaciones reportadas. Por otro lado, uno del aspecto relevante es que, mientras el MBR tiende a mostrar limitaciones en la remoción de los contaminantes de tamaño molecular reducido, la NF puede presentar ciertas dificultades en la separación, esto especialmente sucede cuando se opera con las mezclas complejas de compuestos [12], [25], [30], [33].

E. Condiciones operativas óptimas de MBR y NF

Como se puede observar en la Tabla V, el MBR es más efectivo en las aguas con una alta carga orgánica y baja concentración de los sólidos, operando así de forma estable en condiciones moderadas de pH y temperatura [5], [6], [10], [13]. Mientras que la NF se destaca por la remoción de los

metales pesados y las sales, tolerando así mayores rangos de pH, aunque requiere presiones más altas y mayor control térmico [8], [11], [16], [18], [23]. En consecuencia, estas diferencias operativas explican la posible selección tecnológica en función de los diversos tipos de contaminante y del contexto de los efluentes textiles [14], [17], [21].

TABLA V
CONDICIONES OPERATIVAS ENTRE MBR Y NF

Categoría	MBR	NF	Ref.
Carga orgánica	Funciona bien en aguas con alta carga orgánica y la baja concentración de los sólidos	No es eficaz en aguas con alta carga orgánica, mejor en aguas con contaminantes específicos	[5], [8], [12]
Concentración de sólidos	Eficaz en las aguas con baja concentración de los sólidos en suspensión	Funciona en aguas con media alta concentración de sólidos, aunque con mayor presión.	[6], [9], [15]
PH	Sensible a variaciones extremas de pH, ideal entre 6 y 8	Menos sensible a variaciones del pH, pero eficiente en rangos amplios, entre (4-9)	[10], [16], [20]
Temperatura	Eficaz a temperaturas moderadas (20- 35°C) aunque puede tener variabilidad según el tipo de las aguas	Requiere de las temperaturas mucho más controladas, para así poder evitar el daño de las membranas	[13], [18], [22]
Tipo de contaminante	Ideal para la materia orgánica, los colorantes sintéticos y los compuestos orgánicos	Es ideal para los metales pesados, las sales y también para los compuestos solubles mucho más pequeños	[14], [17], [21]
Condición de presión operativa	No requiere presiones tan altas para la filtración, opera a presiones bajas a medias	Requiere presiones mucho más altas debido a la resistencia de las membranas de filtración	[7], [11], [23]

F. Parámetros físico-químicos antes y después del tratamiento

Como se observa en la Tabla VI, tanto el MBR como la NF han logrado una reducción significativa en los principales parámetros físico-químicos del agua al ser tratada. Donde, el MBR muestra una mayor eficiencia en la remoción de DQO, DBO y colorantes, esto como resultado de su acción biológica sobre la materia orgánica [5], [9], [15]. Y, por otro lado, la NF es especialmente eficaz en reducir la conductividad y la turbidez, lo cual la hace adecuada para escenarios donde se requiere baja salinidad, como la reutilización industrial [6], [14], [21]. Estas mejoras demuestran que ambas tecnologías pueden cumplir con los estándares ambientales, dependiendo así del contaminante predominante

TABLA VI
PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PRE Y POST TRATAMIENTOS

Parámetro	Valores iniciales (antes del tratamiento)	MBR (valores promedio tratados)	NF (valores promedio tratados)	Referencias
DQO (mg/L)	500– 1000	50– 150	60– 120	[5], [9], [15]
DBO (mg/L)	200–600	20–80	25–70	[12], [17], [19]
Color (Pt-Co)	1000–3000	100–300	50–150	[6], [14], [18]
Conductividad (µS/cm)	1000–2500	400–1000	100–300	[7], [13], [21]
Turbidez (NTU)	80–300	5–20	2–10	[10], [16], [22]

G. Eficiencia de remoción y calidad del agua tratada

Como se presenta en la Tabla VII, tanto el MBR como la NF han demostrado eficiencias elevadas en la remoción de los contaminantes. Por un lado, el MBR logra índices de remoción del 90 % al 95 % en la materia orgánica y los colorantes sintéticos, garantizando así el cumplimiento de los límites establecidos para DQO y DBO, por lo que lo hace especialmente adecuado para los procesos que buscan un vertido ambiental seguro [5], [9], [12]. Y por el otro lado la NF presenta una eficiencia del 85 % al 90 % en la remoción de los metales pesados, las sales y los colorantes, generando así un efluente con una calidad mucho más óptima para así hacer una reutilización industrial, especialmente en los procesos que se requieren bajo contenido salino [2], [6], [15]. Es por eso, por lo que los estudios comparativos refuerzan que el MBR es más eficaz frente a los contaminantes orgánicos, mientras que la NF es superior frente a los contaminantes inorgánicos [5], [9], [12], [15].

TABLA VII
CONDICIONES OPERATIVAS ENTRE EL MBR Y NF

Ítem	Contaminantes tratados	Remoción (%)	Calidad del agua tratada	Cumplimiento de límites ambientales	Ref.
MBR	Materia orgánica, colorantes sintéticos	90-95	Cumple con los límites de DQO y DBO establecidas para vertidos	Cumple con estándares de aguas residuales textiles	[5], [9], [12]
NF	Metales pesados, colorantes sintéticos, sales	85-90	Agua tratada adecuada para reutilización en procesos industriales	Cumple con límites de reutilización, en procesos de baja concentración de sales	[2], [6], [15]

Se observa que el MBR es generalmente más eficaz en los contaminantes orgánicos y cumplen con vertido, mientras NF con la reutilización, dependiendo de los contaminantes, ambos cumplen con estándares ambientales [5], [9], [12], [15].

H. Aplicación recomendada según tipo de contaminante predominante

En la Tabla VIII, se muestra cómo la elección entre el MBR y la NF depende de los tipos de contaminantes predominante en el agua residual. Esta relación tecnología–contaminante es clave para definir su aplicación óptima en distintos procesos industriales textiles.

TABLA VIII
APLICACIÓN DE MBR Y NF SEGÚN TIPO DE CONTAMINANTE

Contaminantes	Tecnología eficaz	Justificación	Referencias
Materia orgánica (DQO, DBO)	MBR	Degradación biológica más eficiente	[5], [9], [12], [14], [36]
Colorantes sintéticos	MBR y NF	Ambos retienen color, pero MBR lo degrada	[12], [15], [18], [22], [34]
Metales pesados	NF	Alta retención iónica por tamaño molecular y presión	[10], [16], [20], [25]
Sales	NF	Baja conductividad final, adecuada para reúso	[7], [13], [21], [39], [45], [52]
Materia orgánica (DQO, DBO)	MBR	Degradación biológica más eficiente	[5], [9], [12], [14], [36]

I. Impacto ambiental y sostenibilidad del uso de MBR y NF

En la Tabla IX se comparan los impactos ambientales de las tecnologías MBR y NF. Donde el MBR tiene una reducción significativa de la carga orgánica sin utilizar productos químicos agresivos, aunque genera lodos secundarios que requieren disposición adecuada [5], [11]. La NF, proporciona agua de alta calidad para reúso, pero su operación bajo alta presión conlleva un mayor consumo energético y generación de salmuera [6], [14].

TABLA IX
COMPARACIÓN AMBIENTAL ENTRE MBR Y NF

Tecnología	Aspectos positivos	Limitaciones ambientales	Ref.
MBR	Reducción significativa de DBO/DQO, recuperación biológica y menor uso de químicos	Generación de lodos biológicos, consumo energético moderado	[5], [11], [18]
NF	Alta calidad del agua para reúso, menor espacio requerido, separación eficiente	Alta presión, lo que genera mayor consumo energético, rechazo de salmuera	[6], [14], [22]
Combinación	Alta eficiencia combinada, posibilidad de reúso y cumplimiento ambiental simultáneo	Costos operativos elevados, complejidad técnica	[12], [20], [25]

I. Costos operativos y económicos asociados al uso de MBR y NF

La Tabla X se muestra rangos estimados de los costos operativos asociados al MBR y NF. Donde, el MBR presenta un menor costo promedio debido a su menor demanda energética, aunque requiere gestión constante de lodos y limpieza periódica de membranas [7], [13]. Mientras que la NF tiene costos más altos debido a su operación bajo presión, lo que implica mayor consumo energético y necesidad de pretratamiento del efluente [8], [16].

TABLA X
COSTOS OPERATIVOS

Contaminantes	Costos operativos (USD/m ³)	Factores que impactan el costo	Referencias
MBR	0.35 – 0.70	Limpieza de membranas, consumo eléctrico, mantenimiento biológico	[7], [13], [21]
NF	0.45 – 0.90	Presión energética, recambio de membranas, pretratamiento	[8], [16], [23]

III. DISCUSIÓN

Los artículos que se utilizaron para esta investigación abarcan desde el 2014 hasta inicios del 2025, con un notable aumento en las publicaciones en el 2015, esta concentración temporal podría estar vinculada al creciente interés en el desarrollo de dichas tecnologías. Sin embargo, la caída en el número de publicaciones en algunos años, podrían indicar que ciertas temáticas están saturadas o que el interés se ha desplazado hacia otros tipos de tecnologías. Por lo que se interpreta que el ritmo de publicaciones no solo depende de la novedad de las tecnologías, sino también

de factores como su aplicabilidad y las políticas ambientales de cada país.

En cuanto a la procedencia de los estudios, se observó una alta concentración de publicaciones en los países como Estados Unidos, Alemania y España. Dicha distribución puede atribuirse a la fuerte inversión en investigación y desarrollo en estos países, así como a la presencia de industrias textiles avanzadas y centros académicos especializados en los tratamientos de aguas. Esto podría ser debido a las regulaciones ambientales que son más estrictas en los diversos países mencionados. Por otro lado, se evidencia una escasa participación en los países latinoamericanos, lo que puede representar una oportunidad para el desarrollo de estudios en este ámbito.

Hablando de los contaminantes que encontramos en las aguas residuales textiles, los colorantes sintéticos, la materia orgánica, los metales pesados y las sales son los que más se han reportado [1], [3], [9]. La alta presencia de estos compuestos en los estudios revisados subraya su importancia ambiental y la dificultad que presentan para su tratamiento. Este patrón podría estar influenciado también por la disponibilidad de métodos analíticos más accesibles para estos contaminantes específicos, dejando un poco de lado a otras sustancias emergentes como los compuestos perfluorados o los microplásticos, que todavía no han sido suficientemente explorados en esta área de investigación. Por lo tanto, se sugiere que futuros estudios indaguen sobre la presencia de contaminantes emergentes en los efluentes textiles y cómo se comportan frente a tecnologías como MBR y NF.

En cuanto a término de eficiencia, los estudios revisados muestran que el MBR tiene una gran capacidad para eliminar materia orgánica y colorantes, logrando índices de hasta el 95 % [5], [12]. Esta alta eficiencia podría deberse a la combinación de los procesos biológicos y físicos, que permiten una mejor retención de sólidos y compuestos biodegradables. Además, algunos artículos utilizaron configuraciones avanzadas del MBR o lo combinaron con tratamientos previos, lo que probablemente mejoró su rendimiento. Por otro lado, la NF demostró ser más eficaz en la eliminación de los metales pesados y las sales, alcanzando así las eficiencias de hasta el 90 %, gracias a su mecanismo de separación basado en tamaño y carga [2], [6], [15]. Por lo que, se sugiere que la elección entre ambas tecnologías debería tener en cuenta el perfil contaminante del efluente y los objetivos del tratamiento (vertido vs. reutilización). La combinación de MBR seguido de NF podría ser una opción prometedora, especialmente en sistemas de reutilización de agua industrial.

Entre las principales ventajas del MBR, se destacan su capacidad para funcionar a baja presión, su alta estabilidad biológica y su excelente rendimiento en la eliminación de los contaminantes orgánicos ([9], [12]). Sin embargo, también enfrenta desafíos como el ensuciamiento de las membranas y los costos de mantenimiento. Por otro lado, la NF tiene la ventaja de operar en un rango de pH más amplio y de poder

eliminar eficientemente los contaminantes inorgánicos, aunque requiere de presiones más altas y estas pueden sufrir daños por temperaturas extremas o por productos químicos agresivos ([6], [15]). Al elegir entre estas tecnologías, es fundamental considerar no solo la eficiencia en la eliminación, sino también las condiciones operativas del entorno industrial.

Con respecto a la calidad del agua tratada, se ha observado que el MBR cumple con los estándares de vertido ambiental, especialmente en los parámetros como DQO y DBO. Por su parte, la NF proporciona agua de calidad adecuada para su reutilización en los procesos industriales que tienen requisitos más estrictos de salinidad ([5], [15]). La diferencia en el cumplimiento normativo puede atribuirse a la especialización de cada tecnología en ciertos tipos de contaminantes. Una posible línea de investigación futura podría ser evaluar de manera más integral el comportamiento combinado de estas tecnologías, tanto en términos de eficiencia como de sostenibilidad económica.

Hablando de los parámetros físico-químicos, se observan mejoras notables después de aplicar el MBR y la NF, lo que realmente demuestra su efectividad para así poder cumplir con los estándares de vertido y reúso. En el caso del MBR, la reducción más significativa de DQO y DBO podría ser resultado de que, en los estudios revisados, se utilizaron configuraciones optimizadas con tiempos de retención más largos y combinaciones con etapas biológicas avanzadas [5], [9]. Es posible que esta integración haya facilitado una degradación más efectiva de la materia orgánica, diferenciándose de los sistemas convencionales. Por otro lado, la NF logra resultados superiores en parámetros como la conductividad y la turbidez, probablemente porque varios estudios han utilizado membranas de nueva generación que ofrecen una mayor selectividad iónica [6], [14]. Sería útil profundizar en la caracterización de las condiciones operativas específicas, como la presión y la recirculación, para entender por qué algunos valores superan los reportados en revisiones anteriores.

En cuanto a la aplicación recomendada según el tipo de contaminante, se confirma que la elección de la tecnología depende directamente del perfil contaminante. Desde un punto de vista, el MBR es más eficaz para cargas orgánicas altas, mientras que la NF es esencial para poder eliminar metales pesados y sales [10], [16]. Este hallazgo se alinea con la evidencia reportada en investigaciones previas, ya que sería interesante explorar cómo la combinación en serie podría prolongar la vida útil de las membranas y reducir el ensuciamiento, ya que este aspecto no se aborda en detalle en todos los artículos revisados. Por lo que se recomienda investigar sistemas híbridos con flujos de recirculación y etapas de pretratamiento para definir mejores estrategias de aplicación según el contaminante predominante.

Entre las limitaciones de esta revisión, se encuentra la falta de información homogénea en los artículos sobre las condiciones operativas exactas (presión, temperatura, pH),

lo que dificulta una comparación directa. Además, se ha identificado una escasez de estudios que analicen el rendimiento económico o energético de estas tecnologías, lo que limita la proyección real en diversos contextos industriales. Por lo tanto, se sugiere incluir estos indicadores en futuras investigaciones para así fortalecer la aplicabilidad de los resultados.

Finalmente, se identificó como oportunidad futura el estudio de los contaminantes emergentes no abordados de forma sistemática en los artículos revisados anteriormente, así como la evaluación de tecnologías híbridas o combinadas en contextos latinoamericanos. Por tal motivo se sugiere promover estudios piloto a escala real que puedan validar los hallazgos de laboratorio y se adapten a la realidad de las industrias textiles en países en vías de desarrollo.

IV. CONCLUSIONES

En esta investigación se comparó de forma sistemática el desempeño entre el biorreactor de membranas y la nanofiltración como tecnologías aplicadas al tratamiento de aguas residuales textiles, respondiendo al objetivo de analizar su eficiencia de remoción de contaminantes y la calidad del agua tratada. Ambas resultaron efectivas, aunque con niveles de eficiencia diferenciados: en el caso del MBR se evidenció una mayor reducción de DQO, DBO y los colorantes sintéticos fue más eficiente en la remoción de contaminantes orgánicos y colorantes, alcanzando tasas de eliminación de entre 90 % y 95 % esto debido a la integración de procesos biológicos y membranas que permiten una mejor degradación de la materia orgánica. Y por el otro lado la NF mostró mejor desempeño en la reducción de parámetros como la conductividad, la turbidez, y la remoción de metales pesados y sales, además demostró mayor eficacia en la retención de contaminantes inorgánicos como metales pesados y sales, con porcentajes que oscilan entre el 85 % y el 90 %, lo que garantiza un efluente adecuado para su reutilización en procesos industriales.

Los principales hallazgos evidencian que la aplicación de cada tecnología depende del tipo del contaminante predominante, en el caso del MBR es más adecuado para efluentes con alta carga orgánica, mientras que la NF es preferible para corrientes con alto contenido de sales o metales pesados. Asimismo, se destaca que dichos métodos pueden cumplir con los estándares ambientales vigentes, y su combinación secuencial podría representar una alternativa robusta para maximizar la eficiencia de tratamiento.

Esta RSL enriquece la literatura existente al ofrecer una síntesis actualizada sobre la eficacia comparativa de MBR y NF, así como sus condiciones operativas, ventajas y limitaciones. Asimismo, resalta la ubicación geográfica de las investigaciones y los intervalos con mayor actividad científica, señalando al año 2015 como el periodo con mayor producción. Se sugiere que estudios futuros prioricen evaluaciones a escala piloto en condiciones reales, especialmente en América Latina, donde la incorporación de estas tecnologías aún es incipiente.

También se recomienda investigar la eficiencia de estas tecnologías frente a contaminantes emergentes no tratados, como microplásticos o compuestos perfluorados, y tener en cuenta análisis económicos y de sostenibilidad energética. Por último, se propone evaluar la implementación de sistemas híbridos MBR-NF que combinen lo mejor de ambas tecnologías para maximizar el tratamiento del agua en la industria textil.

REFERENCIAS

- [1] V. Jegatheesan, B. K. Pramanik, J. Chen, D. Navaratna, C. Y. Chang, and L. Shu, "Treatment of textile wastewater with membrane bioreactor: A critical review," *Bioresour Technol*, vol. 204, pp. 202–212, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2016.01.006.
- [2] M. I. Alcaina-Miranda, S. Barredo-Damas, A. Bes-Piá, M. I. Iborra-Clar, A. Iborra-Clar, and J. A. Mendoza-Roca, "Nanofiltration as a final step towards textile wastewater reclamation," *Desalination*, vol. 240, no. 1–3, pp. 290–297, May 2009, doi: 10.1016/J.DESAL.2008.02.028.
- [3] Y. Liu, J. Zhu, M. S. Chi, G. Van Eygen, K. Guan, and H. Matsuyama, "Comprehensive review of nanofiltration membranes for efficient resource recovery from textile wastewater," *Chemical Engineering Journal*, vol. 506, p. 160132, Jan. 2025, doi: 10.1016/J.CEJ.2025.160132.
- [4] N. C. Cinperi, E. Ozturk, N. O. Yigit, and M. Kitis, "Treatment of woolen textile wastewater using membrane bioreactor, nanofiltration and reverse osmosis for reuse in production processes," *J Clean Prod*, vol. 223, pp. 837–848, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.03.166.
- [5] M. Kamaz et al., "Investigation into micropollutant removal from wastewaters by a membrane bioreactor," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 16, no. 8, Apr. 2019, doi: 10.3390/ijerph16081363.
- [6] K. Li et al., "Influence of nanofiltration concentrate recirculation on performance and economic feasibility of a pilot-scale membrane bioreactor-nanofiltration hybrid process for textile wastewater treatment with high water recovery," *J Clean Prod*, vol. 261, p. 121067, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.121067.
- [7] Z. An et al., "Anaerobic membrane bioreactor for the treatment of high-strength waste/wastewater: A critical review and update," *Chemical Engineering Journal*, vol. 470, p. 144322, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.CEJ.2023.144322.
- [8] E. S. Tecirli, K. Akgün, A. Çaglak, H. Sari Erkan, and G. Onkal Engin, "Treatment of textile wastewater in combined granular activated carbonmembrane bioreactor (GAC-MBR)," *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 42, no. 5, pp. 1490–1499, Oct. 2024, doi: 10.14744/sigma.2024.00115.
- [9] L. Rendón-Castrillón, M. Ramírez-Carmona, C. Ocampo-López, F. González-López, B. Cuartas-Urbe, and J. A. Mendoza-Roca, "Treatment of water from the textile industry contaminated with indigo dye: A hybrid approach combining bioremediation and nanofiltration for sustainable reuse," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 8, p. 100498, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.CSCEE.2023.100498.
- [10] R. Kumar, P. Chakraborty, S. Chakraborty, B. Basak, and B. H. Jeon, "Synergy of textile dyeing wastewater treatment along with water reclamation using membrane-enabled approach," *Current Developments in Bioengineering and Biotechnology: Advances in Eco-friendly and Sustainable Technologies for the Treatment of Textile Wastewater*, pp. 279–302, Jan. 2023, doi: 10.1016/B978-0-323-91235-8.00015-2.
- [11] S. Jallouli et al., "Electro living membrane bioreactor for efficient and sustainable treatment of textile wastewater and enhanced fouling control," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 72, p. 107523, Apr. 2025, doi: 10.1016/J.JWPE.2025.107523.
- [12] N. N. R. Ahmad, W. L. Ang, Y. H. Teow, A. W. Mohammad, and N. Hilal, "Nanofiltration membrane processes for water recycling, reuse and product recovery within various industries: A review," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 45, p. 102478, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.JWPE.2021.102478.
- [13] H. E. Jijngi, S. K. Yazdi, Y. A. Abakar, and E. Etim, "Evaluation of membrane bioreactor (MBR) technology for industrial wastewater treatment and its application in developing countries: A review," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 10, p. 100886, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.CSCEE.2024.100886.
- [14] M. Bassyouni, A. Eteba, M. H. Elzahar, and mohamed Z. Elshikhiby, "Utilization of Biodegradable Nanofiltration Membrane for Efficient Removal of Anionic Textile Dye," *Egypt J Chem*, vol. 0, no. 0, pp. 0–0, Jul. 2024, doi: 10.21608/ejchem.2024.296854.9846.
- [15] M. Alotaibi, A. Refaat, F. Munshi, M. A. El-Said, and S. A. El-Shafai, "Influence of Organic Loading Rates on the Treatment Performance of Membrane Bioreactors Treating Saline Industrial Wastewater," *Water (Switzerland)*, vol. 16, no. 18, Sep. 2024, doi: 10.3390/w16182629.
- [16] A. A. E. A. Elfiky, M. F. Mubarak, M. Keshawy, I. E. T. El Sayed, and T. A. Moghny, "Novel nanofiltration membrane modified by metal oxide nanocomposite for dyes removal from wastewater," *Environ Dev Sustain*, vol. 26, no. 8, pp. 19935–19957, Aug. 2024, doi: 10.1007/s10668-023-03444-1.
- [17] F. Arshad, D. E. Al Momani, W. M. de Vos, and L. Zou, "Nanocomposite membrane for simultaneous removal of dye and heavy metal ions from wastewater," *J Environ Manage*, vol. 371, p. 123242, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2024.123242.
- [18] S. Prabha et al., "Suitability of conventional and membrane bioreactor system in textile mill effluent treatment," *Desalination Water Treat*, vol. 56, no. 1, pp. 14–23, Sep. 2015, doi: 10.1080/19443994.2014.932716.
- [19] S. Huang, C. K. Pooi, X. Shi, S. Varjani, and H. Y. Ng, "Performance and process simulation of membrane bioreactor (MBR) treating petrochemical wastewater," *Science of The Total Environment*, vol. 747, p. 141311, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.141311.
- [20] G. Sert et al., "Performances of some NF and RO membranes for desalination of MBR treated wastewater," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 16, pp. 193–198, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.JWPE.2016.11.009.
- [21] T. B. Nguyen et al., "Anaerobic membrane bioreactors for industrial wastewater treatment," *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Advanced Membrane Separation Processes for Sustainable Water and Wastewater Management - Anaerobic Membrane Bioreactor Processes and Technologies*, pp. 167–196, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-819852-0.00007-5.
- [22] H. Rondon et al., "Application of enhanced membrane bioreactor (eMBR) to treat dye wastewater," *Bioresour Technol*, vol. 183, pp. 78–85, May 2015, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2015.01.110.
- G. Sert et al., "Investigation of mini pilot scale MBR-NF and MBR-RO integrated systems performance—Preliminary field tests," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 12, pp. 72–77, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.JWPE.2016.06.008.
- [23] S. Arabi et al., "Membrane processes," Oct. 01, 2020, John Wiley and Sons Inc. doi: 10.1002/wer.1385.
- [24] N. J. Falizi, M. C. Hacifazlıoğlu, İ. Parlar, N. Kabay, T. Pek, and M. Yüksel, "Evaluation of MBR treated industrial wastewater quality before and after desalination by NF and RO processes for agricultural reuse," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 22, pp. 103–108, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.JWPE.2018.01.015.
- [25] I. Friha et al., "Treatment of textile wastewater by submerged membrane bioreactor: In vitro bioassays for the assessment of stress response elicited by raw and reclaimed wastewater," *J Environ*

- Manage, vol. 160, pp. 184–192, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2015.06.008.
- [26] K. Li, C. Jiang, J. Wang, and Y. Wei, “The color removal and fate of organic pollutants in a pilotscale MBR-NF combined process treating textile wastewater with high water recovery,” *Water Science and Technology*, vol. 73, no. 6, pp. 1426–1433, Mar. 2016, doi: 10.2166/wst.2015.623.
- [27] C. M. Barreto, H. A. Garcia, C. M. Hooijmans, A. Herrera, and D. Brdjanovic, “Assessing the performance of an MBR operated at high biomass concentrations,” *Int Biodeterior Biodegradation*, vol. 119, pp. 528–537, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.IBIOD.2016.10.006.
- [28] S. De Gisi and M. Notarnicola, “Industrial Wastewater Treatment,” *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, pp. 23–42, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10167-8.
- [29] F. I. Hai, L. N. Nguyen, L. D. Nghiem, B.-Q. Liao, I. Koyuncu, and W. E. Price, “Trace Organic Contaminants Removal by Combined Processes for Wastewater Reuse,” 2014, pp. 39–77. doi: 10.1007/698_2014_318.
- [30] Q. Chen, Y. Yang, M. Zhou, M. Liu, S. Yu, and C. Gao, “Comparative study on the treatment of raw and biologically treated textile effluents through submerged nanofiltration,” *J Hazard Mater*, vol. 284, pp. 121–129, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2014.11.009.
- [31] Z. Lü et al., “Composite nanofiltration membrane with asymmetric selective separation layer for enhanced separation efficiency to anionic dye aqueous solution,” *J Hazard Mater*, vol. 368, pp. 436–443, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2019.01.086.
- [32] T. V. Luong, S. Schmidt, S. A. Deowan, J. Hoinkis, A. Figoli, and F. Galiano, “Membrane Bioreactor and Promising Application for Textile Industry in Vietnam,” *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 419–424, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROCIR.2016.01.083.
- [33] S. R. Panda and S. De, “Performance evaluation of two stage nanofiltration for treatment of textile effluent containing reactive dyes,” *J Environ Chem Eng*, vol. 3, no. 3, pp. 1678–1690, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.JECE.2015.06.004.
- [34] W. Song, B. Xie, S. Huang, F. Zhao, and X. Shi, “Aerobic membrane bioreactors for industrial wastewater treatment,” *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Advanced Membrane Separation Processes for Sustainable Water and Wastewater Management - Aerobic Membrane Bioreactor Processes and Technologies*, pp. 129–145, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-819809-4.00006-1.
- [35] P. Babatsouli, I. Palogos, E. Michalodimitraki, C. Costa, and N. Kalogerakis, “Evaluation of a MBR pilot treating industrial wastewater with a high COD/N ratio,” *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 90, no. 1, pp. 26–33, Jan. 2015, doi: 10.1002/jctb.4364.
- [36] G. Masmoudi, E. Ellouze, F. ElAyni, and R. Ben Amar, “Surfactants role in the enhancement of the treatment efficiency of the dyeing effluents with combination of membrane processes,” *Desalination Water Treat*, vol. 52, no. 10–12, pp. 2322–2329, Feb. 2014, doi: 10.1080/19443994.2013.825879.
- [37] A. Tolkou, A. Zouboulis, and P. Samaras, “The Incorporation of Ceramic Membranes in MBR Systems for Wastewater Treatment: Advantages and Patented New Developments,” 2014.
- [38] M. Pellegrin et al., “Membrane Processes,” *Water Environment Research*, vol. 87, no. 10, pp. 1000–1074, Oct. 2015, doi: 10.2175/106143015X14338845155345.
- [39] A. Shahmansouri and C. Bellona, “Nanofiltration technology in water treatment and reuse: Applications and costs,” *Water Science and Technology*, vol. 71, no. 3, pp. 309–319, 2015, doi: 10.2166/wst.2015.015.
- [40] L. L. Salazar Gámez, M. Crespi, S. Lorena, C. Martí, and S. Roberto, “Treatment of textile waste water by membrane bioreactor,” 2011. [Online]. Available: www.deswater.com
- [41] M. Casamitjana Agrosavia, I. Rodríguez Roda, and M. Dalmau, “Influence of sludge recirculation on nutrient removal in submerged membrane bioreactors,” doi: 10.14508/reia.2015.11.E2.77-83.
- [42] X. Luo et al., “Energy-efficient trehalose-based polyester nanofiltration membranes for zero-discharge textile wastewater treatment,” *J Hazard Mater*, vol. 465, p. 133059, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2023.133059.
- [43] T. Yilmaz et al., “Performance of a high-rate membrane bioreactor for energy-efficient treatment of textile wastewater,” *J Environ Manage*, vol. 358, p. 120845, May 2024, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2024.120845.
- [44] A. Yurtsever, E. Basaran, D. Ucar, and E. Sahinkaya, “Self-forming dynamic membrane bioreactor for textile industry wastewater treatment,” *Science of The Total Environment*, vol. 751, p. 141572, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.141572.
- [45] C. R. Holkar, A. J. Jadhav, D. V. Pinjari, N. M. Mahamuni, and A. B. Pandit, “A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches,” *J Environ Manage*, vol. 182, pp. 351–366, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2016.07.090.
- [46] X. Zhang, “Selective separation membranes for fractionating organics and salts for industrial wastewater treatment: Design strategies and process assessment,” *J Memb Sci*, vol. 643, p. 120052, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.MEMSCI.2021.120052.
- [47] E. Sahinkaya, A. Yurtsever, and Ö. Çınar, “Treatment of textile industry wastewater using dynamic membrane bioreactor: Impact of intermittent aeration on process performance,” *Sep Purif Technol*, vol. 174, pp. 445–454, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.SEPPUR.2016.10.049.
- [48] C. Kappel, A. J. B. Kemperman, H. Temmink, A. Zwijnenburg, H. H. M. Rijnaarts, and K. Nijmeijer, “Impacts of NF concentrate recirculation on membrane performance in an integrated MBR and NF membrane process for wastewater treatment,” *J Memb Sci*, vol. 453, pp. 359–368, Mar. 2014, doi: 10.1016/J.MEMSCI.2013.11.023.
- [49] M. Brik, P. Schoeberl, B. Chamam, R. Braun, and W. Fuchs, “Advanced treatment of textile wastewater towards reuse using a membrane bioreactor,” *Process Biochemistry*, vol. 41, no. 8, pp. 1751–1757, Aug. 2006, doi: 10.1016/J.PROCBIO.2006.03.019.
- [50] Z. Badani, H. Ait-Amar, A. Si-Salah, M. Brik, and W. Fuchs, “Treatment of textile waste water by membrane bioreactor and reuse,” *Desalination*, vol. 185, no. 1–3, pp. 411–417, Nov. 2005, doi: 10.1016/J.DESAL.2005.03.088.
- [51] M. Gündoğdu, Y. A. Jarma, N. Kabay, T. Pek, and M. Yüksel, “Integration of MBR with NF/RO processes for industrial wastewater reclamation and water reuse-effect of membrane type on product water quality,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 29, p. 100574, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.JWPE.2018.02.009.
- [52] C. Fersi, L. Gzara, and M. Dhahbi, “Treatment of textile effluents by membrane technologies,” *Desalination*, vol. 185, no. 1–3, pp. 399–409, Nov. 2005, doi: 10.1016/J.DESAL.2005.03.087.