

Industrial Wastewater Treatment with Advanced Chemical Methods: A Systematic Review of Trends and Challenges (2020-2025)

Jheyson Aldair Echevarria Pérez¹, Cristhian Anyelo Arroyo Camacuari², Luis Enrique Cuevas Tenorio³, Edgar Coaquira Torres⁴

^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Perú,

U18205294@utp.edu.pe, U20249891@utp.edu.pe, C28109@utp.edu.pe, C26817@utp.edu.pe

Abstract– *This systematic review analyzes advanced chemical methods for industrial wastewater treatment, focusing on their efficiency, operating conditions and sectoral applications. Applying the PRISMA methodology and the PICO scheme, recent studies (2020-2025) were evaluated showing the superiority of hybrid systems. Combined processes such as electro-Fenton + UV achieved up to 100% pollutant removal in the textile industry, while Fenton + electrocoagulation showed efficiencies of 98.5% in COD. Oxidation with thermally activated persulfate exceeded 79% efficiency for recalcitrant compounds. The results highlight that integrated technologies consistently outperform unitary treatments, offering more effective solutions for complex industrial effluents.*

Keywords– *Wastewater treatment, systematic review, hybrid methods, removal efficiency.*

Tratamiento de Aguas Residuales Industriales con Métodos Químicos Avanzados: Una Revisión Sistemática de Tendencias y Desafíos (2020-2025)

Cristhian Anyelo Arroyo Camacuari¹, Jheyson Aldair Echevarria Pérez², Luis Enrique Cuevas Tenorio³, Edgar Coaquira Torres⁴

^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Perú,

U18205294@utp.edu.pe, U20249891@utp.edu.pe, C28109@utp.edu.pe, C26817@utp.edu.pe

Resumen– Esta revisión sistemática analiza los métodos químicos avanzados para el tratamiento de aguas residuales industriales, centrándose en su eficiencia, condiciones operativas y aplicaciones sectoriales. Aplicando la metodología PRISMA y el esquema PICO, se evaluaron estudios recientes (2020-2025) que demuestran la superioridad de los sistemas híbridos. Los procesos combinados como electro-Fenton + UV alcanzaron hasta 100% de remoción de contaminantes en la industria textil, mientras que Fenton + electrocoagulación mostró eficiencias del 98.5% en DQO. La oxidación con persulfato activado térmicamente superó el 79% de eficacia para compuestos recalcitrantes. Los resultados destacan que las tecnologías integradas superan consistentemente a los tratamientos unitarios, ofreciendo soluciones más efectivas para efluentes industriales complejos.

Palabras clave– Tratamiento de aguas residuales, revisión sistemática, métodos híbridos, eficiencia de remoción.

I. INTRODUCCIÓN

La gestión de las aguas residuales industriales constituye un reto prioritario para la sostenibilidad ambiental debido a la elevada presencia de materia orgánica, metales pesados, compuestos tóxicos y microorganismos patógenos en sus efluentes [1]. Sectores como el textil, farmacéutico, minero y alimentario liberan grandes volúmenes de estos residuos líquidos que, si no reciben un tratamiento adecuado, deterioran los ecosistemas acuáticos y terrestres, afectan la biodiversidad y generan riesgos sanitarios para las poblaciones humanas cercanas [2-4].

Para cumplir con las exigencias regulatorias actuales se han desarrollado tecnologías químicas avanzadas capaces de degradar contaminantes recalcitrantes. Entre las más estudiadas destacan los Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs), en particular Fenton, electro-Fenton y la oxidación con persulfato, ya que producen radicales hidroxilos (OH) de alto poder oxidante [5]. A escala industrial, estos procesos se combinan con técnicas como la coagulación-floculación química, la electrocoagulación, la fotocatalisis o la adsorción en carbón activado dentro de trenes secuenciales que incluyen ajuste de pH, dosificación de reactivos, reacción química y sedimentación. Estrategias híbridas como EC + EO + AC o UV + AC + EF han logrado remociones cercanas al 100 % de la demanda química de oxígeno y de colorantes en efluentes textiles, mientras que la coagulación-Fenton supera el 90 % de eficiencia en la industria alimentaria [6-8].

Pese a estos avances, la evidencia publicada entre 2020 y 2025 sigue dispersa y, en ocasiones, contradictoria en cuanto a la eficiencia comparativa, las condiciones operativas óptimas y las limitaciones de los distintos tratamientos químicos y sus combinaciones. A la fecha, no existe una revisión sistemática de la literatura que sintetice estos hallazgos y oriente la selección de tecnologías costo-efectivas para efluentes industriales complejos.

La presente revisión sistemática se propone, en primer lugar, compilar y evaluar críticamente los estudios recientes acerca del desempeño de los AOPs, la electrocoagulación y los sistemas híbridos en la remoción de contaminantes industriales. En segundo lugar, busca comparar las eficiencias, las condiciones operativas y las restricciones técnicas o económicas de estas tecnologías. Finalmente, pretende ofrecer recomendaciones basadas en la evidencia para investigadores, operadores y responsables de políticas ambientales, con el fin de apoyar la adopción de procesos más eficaces y sostenibles.

El documento se organiza de la siguiente manera. La Sección 2 describe el protocolo de búsqueda, selección y evaluación de estudios empleado en esta revisión sistemática de la literatura. La Sección 3 presenta los principales hallazgos derivados del análisis de los artículos seleccionados. En la Sección 4 se desarrolla un análisis crítico de las evidencias recopiladas, destacando las tendencias actuales, los avances identificados y las oportunidades de mejora. Por último, la Sección 5 resume los aportes más relevantes de esta revisión, señala sus limitaciones metodológicas y conceptuales y sugiere líneas de investigación futura destinadas a fortalecer el conocimiento en esta área.

II. METODOLOGÍA

La revisión se estructuró con base en el esquema PIOC (Problema, Intervención, Resultado y Contexto), ampliamente empleado en investigaciones orientadas a la toma de decisiones porque facilita la delimitación de la pregunta y la búsqueda bibliográfica [3]. En nuestro caso, el Problema (P) se definió como los sistemas de tratamiento de aguas residuales, la Intervención (I) como los métodos químicos aplicados a dichas aguas, el Resultado (O) como la eficiencia del tratamiento y el Contexto (C) como la industria manufacturera. No se incluyó un comparador externo, pues el objetivo fue agrupar y cotejar los métodos químicos entre sí.

A partir de PIOC se formularon cuatro preguntas de investigación:

- (P) ¿Qué métodos químicos se emplean actualmente para tratar las aguas residuales industriales?
- (I) ¿Qué sistemas de tratamiento se describen con mayor frecuencia en la literatura reciente?
- (O) ¿Qué tipos específicos de procesos químicos han sido implementados en la práctica?
- (C) ¿Cuáles son los resultados de eficiencia reportados para cada sistema?

TABLA 1
PALABRAS CLAVE POR COMPONENTE PIOC

P (Problema)	Wastewater treatment Water treatment technologies Secondary treatment
I (Intervención)	Chemical methods Chemical precipitation Advanced oxidation processes Electrocoagulation Disinfection Fenton process
(O) Resultados	Energy efficiency analysis Chemical oxygen demand (COD) Systematic review Meta-analysis Comparative study Performance evaluation
C (Contexto)	Industry

Con las palabras clave de tabla1 se formó la siguiente ecuación de búsqueda:

(TITLE-ABS-KEY ("WASTEWATER TREATMENT" OR "WATER TREATMENT TECHNOLOGIES" OR "SECONDARY TREATMENT") AND TITLE-ABS-KEY ("CHEMICAL METHODS" OR "CHEMICAL PRECIPITATION" OR "ADVANCED OXIDATION PROCESSES" OR electrocoagulation OR disinfection OR "FENTON PROCESS") AND TITLE-ABS-KEY ("ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS" OR "CHEMICAL OXYGEN DEMAND" OR "SYSTEMATIC REVIEW" OR "META-ANALYSIS" OR "COMPARATIVE STUDY" OR "PERFORMANCE EVALUATION") AND TITLE-ABS-KEY (industry))

Para la selección de artículos se planteó los siguientes criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión

- CI1: Artículos originales que describan exclusivamente métodos de tratamiento químicos aplicados a aguas residuales industriales.
- CI2: Estudios que presenten datos cuantitativos sobre la eficacia del método.
- CI3: Investigaciones que detallen las condiciones de operación y el procedimiento seguido.

CI4: Trabajos realizados en planta piloto o condiciones industriales, no limitados a pruebas de laboratorio a escala micro.

Criterios de exclusión

- CE1: Investigaciones en entornos de simulación o en laboratorios de prueba.
- CE2: Revisiones, actas de congreso, tesis, libros o capítulos de libro.
- CE3: Publicaciones en idiomas distintos del español o del inglés.
- CE4: Artículos publicados anteriores al 2020.

Descripción del proceso de selección

Para la estrategia de proceso de obtención de artículos se utilizó Scopus como único medio de selección de los artículos correspondientes a las componentes PIOC, para ello se utilizó los operadores booleanos “OR” y “AND”, para la relación de las palabras clave, obteniendo de esta manera el primer resultado. Como primer resultado se obtuvo 812 documentos. Figura 1 proceso de selección de artículos Resultados obtenidos del proceso de búsqueda de literatura Científica.

Metodología PRISMA

En la presente investigación es una revisión donde se realizó una descripción de la lógica de selección considerada (PRISMA), al realizar la identificación de la base de datos se consideró las siguientes revisiones:

Identificación: se obtuvo como resultado 812 artículos que son una sola base de datos que están directamente relacionados a componentes de las PIOC también es cual está definida por las palabras claves de la pregunta, también una ecuación búsqueda especializada.

Cribado: se aplicó una exclusión de 315 a los artículos que no se ajustan solo estudio de los artículos incluidos deben de mencionar solo los métodos de tratamiento químicos, 150 los artículos no menciona los resultados del sistema de métodos de tratamiento químico, 67 artículos no describen de cómo se realiza el tratamiento químico que se aplicó para obtener resultados en las aguas residuales y los 193 artículos revisados no aborda resultados que se desarrollaron en entornos de actividad real, aplicando los criterios de exclusión 30 artículos revisados no cumplen con el idioma, año.

Incluidos: se realizó una evaluación a los artículos identificando que estos cumplan con los criterios de inclusión y exclusión Descripción detallada de los pasos del proceso de selección y sus resultados (PRISMA)[4]

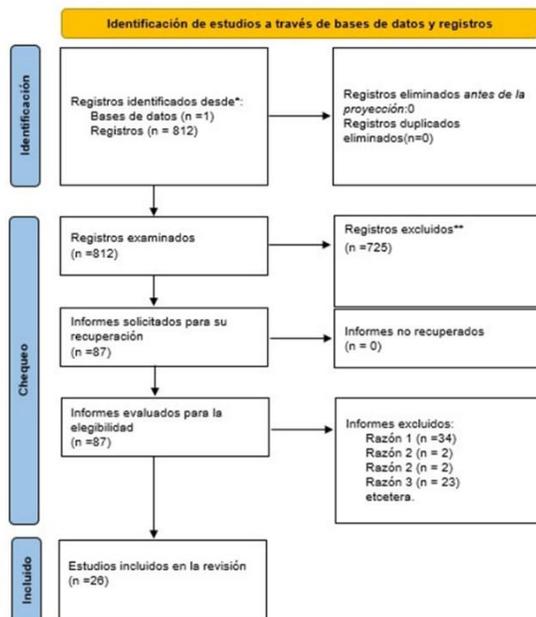


Fig.1. Diagrama de flujo PRISMA

III. RESULTADOS

Al analizar los artículos publicados entre 2020 y 2022, se observa un crecimiento progresivo en la producción académica: en 2020 se publicaron 5 artículos, en 2021 aumentaron a 9 y en 2022 alcanzaron los 10, lo que refleja una tendencia ascendente en el volumen de investigaciones durante este periodo.

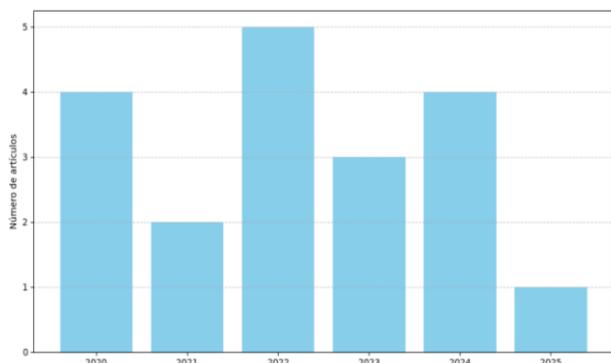


Fig.2. Número de publicaciones por año

Los artículos analizados provienen de diversos países, a pesar de estar escritos en inglés. Entre las fuentes se identificaron contribuciones de Irak (1 estudio de la Universidad de Bagdad), Turquía (2 estudios), Pakistán (3 estudios), Irán (2 estudios, uno de ellos en colaboración con Brasil y Polonia), Colombia (2 estudios), India (4 estudios), Etiopía (1 estudio), Polonia (2 estudios, incluyendo la colaboración mencionada), China (1 estudio) y Portugal (2 estudios), lo que evidencia una distribución geográfica diversa en la producción académica revisada.

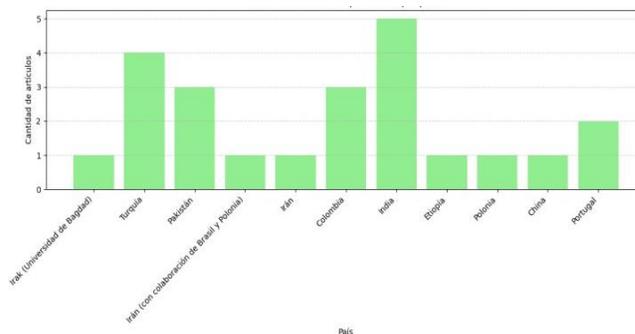


Fig.3. Número de artículos publicados por país.

¿Qué método de sistema de tratamiento químico se utiliza para determinar la eficiencia de tratamiento de aguas residuales en industria?

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA), entre ellos Fenton, electro-Fenton, electro-oxidación y la oxidación con persulfato térmicamente activado ($S_2O_8^{2-}$) [5–8] concentran la mayor atención porque consiguen mineralizar compuestos orgánicos recalcitrantes y eliminar contaminantes emergentes. A estos se suman los procesos de coagulación-floculación, en los que coagulantes como cloruro férrico o cloruro de polialuminio, complementados con floculantes como alcohol polivinílico, logran altas remociones de carga orgánica; además, cuando se acoplan con electro-Fenton o con adsorción en carbón activado se potencia la reducción de toxicidad y la clarificación del efluente [9–11]. Otras tecnologías precipitación química, fotocatalisis, adsorción física y digestión anaerobia se emplean de forma puntual en función de la composición del efluente y de los objetivos de remoción [7, 12–14].

La elección de cada proceso varía sustancialmente según el sector industrial. En la industria textil, del cuero y farmacéutica, donde predominan colorantes y compuestos orgánicos de alta demanda química de oxígeno, las combinaciones de coagulación-floculación con electro-Fenton han alcanzado remociones superiores al 95 % [11, 15–17]. En el ámbito minero, caracterizado por efluentes cargados de reactivos orgánicos y metales pesados, la electro-oxidación y la peroxi-coagulación han mostrado una alta eficacia para degradar los reactivos residuales [6]. Los lavaderos automotrices, con presencia significativa de fenoles, lignina y aceites, obtienen buenos resultados mediante tratamientos híbridos que combinan oxidación y adsorción, con eficiencias por encima del 90 % [18]. Por su parte, la industria láctea, que produce efluentes ricos en nutrientes y materia orgánica, suele preferir la coagulación química como alternativa costo-efectiva, alcanzando remociones cercanas al 92 % [14]. Estas diferencias confirman que la efectividad de un sistema químico depende de la naturaleza y

complejidad de cada efluente industrial, lo que justifica el diseño de esquemas de tratamiento a la medida de cada caso.

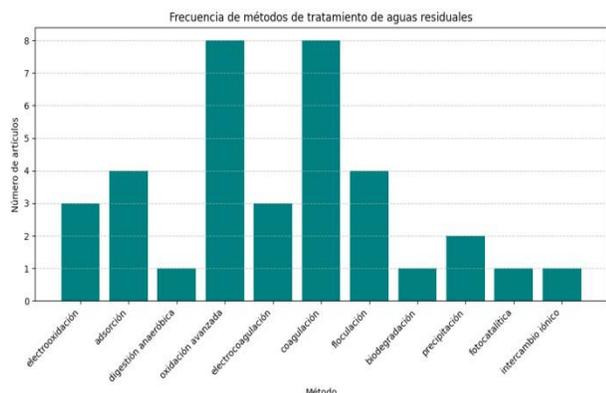


Fig.4. Métodos de tratamientos de agua.

¿Cuáles son los sistemas de tratamiento para aguas residuales?

Los esquemas más usados de tratamiento químico de aguas residuales comienzan con un pretratamiento que elimina sólidos gruesos, seguido del ajuste de pH y la dosificación de reactivos; la mezcla y la reacción química ocurren en tanques agitados, y la línea principal concluye con la sedimentación o separación sólido-líquido [5, 6, 10, 13, 18, 19]. En sistemas de mayor complejidad se añaden etapas electroquímicas como electrocoagulación y electro-oxidación y, en algunos casos, se incorpora sonicación, fotocatalisis o radiación UV, lo que incrementa la generación de especies oxidantes y acelera la descomposición de contaminantes [15, 16, 20, 21]. La eficacia global se controla mediante la medición de parámetros como DQO, carbono orgánico total (COT) y toxicidad residual [12, 18].

En la práctica industrial predominan combinaciones sinérgicas tales como **EC + EO + AC**, coagulación-floculación + adsorción, Fenton + electrocoagulación y UV + electro-Fenton. Estos trenes de proceso alcanzan reducciones significativas de DQO, SST y contaminantes específicos — por ejemplo, nitrógeno amoniacal y moléculas recalcitrantes— gracias a los mecanismos complementarios de coagulación, oxidación y adsorción [5, 6, 8, 10, 17, 22–24]. En particular, los sistemas **Fenton** asistidos por corriente eléctrica o radiación UV han reportado **eficiencias de remoción superiores al 95 %** [19, 24].

La selección del tratamiento depende directamente de la matriz del efluente. Cuando el problema principal son los sólidos suspendidos, se prefiere la coagulación química o la electrocoagulación [7, 15]. Si la carga orgánica es elevada o contiene compuestos resistentes, se opta por procesos Fenton, electro-Fenton o UV-Fenton, a menudo combinados con adsorción para pulir el efluente [6, 8, 13, 22]. En el caso de contaminantes específicos —como pesticidas organoclorados o anilina— se priorizan AOPs basados en persulfato activado

térmicamente o en fotocatalisis, que generan radicales altamente reactivos capaces de mineralizar estas moléculas tóxicas [16, 20, 25].

Tabla 2
COMPONENTES PARA SISTEMA DE TRATAMIENTOS DE AGUA

Sistema de Tratamiento	Componentes o Combinación	Eficiencia (%)	Indicadores Evaluados
EC + EO combinado	Al (EC) + Co-MnNi (EO)	98% vs. EC (80%) y EO (45%)	DQO
Coagulación + Floculación + Adsorción	PAC / FC + carbón activado + PVA	Hasta 97.5% DQO/DBO, 97.4% TSS	DQO, TSS, grasas
Fenton + Electrocoagulación (EF+EC)	Fenton + EC	98.5% DQO, 99.2% SST	DQO, SST
UV + AC + Electro-Fenton	UV + carbón activado + EF	100% remoción	DQO, color
Electro-Fenton (solo)	EF clásico	89.55% DQO, 88.88% DBO, 100% coliformes	DQO, DBO, coliformes
Fenton + Fotocatalisis	Fenton + radiación UV	89.6% DQO, 48.3% conductividad	DQO, conductividad
EC + Sonicación	Electrocoagulación + ultrasonido	75.6% DQO, 70% AN	DQO, AN
Coagulación química (PAC)	PAC	62.6% DQO, 44.3% COT, 87.6% SST	DQO, COT, SST
Fenton (solo)	Fe ²⁺ /H ₂ O ₂	55.6% DQO, ~90% color	DQO, color
Electrocoagulación + GAC	EC + carbón activado granular	82.37% DQO	DQO
EC solo	EC	77.62% DQO, 45% color, 40% TOC	DQO, color, TOC
DA + membranas	Digestión anaeróbica + membranas	51.3% DQO, 45% DBO	DQO, DBO
Oxidación Avanzada (Sulfato + OH⁻)	SO ₄ ^{-•} + OH ^{-•}	>79% DQO	DQO, subproductos
FC + PVA PAC + PVA	Floculantes químicos + polímeros	95.3%-97.5% grasas, DBO, DQO, TSS	TSS, grasas, DQO
Reducción específica	Lactosa: 32.5-40.61%	Lactosa	

Eliminación de panisidina	Fenton	88.95% anisidina, 76.43% COD	COD, anisidina
----------------------------------	--------	---------------------------------------	-------------------

¿Cuáles fueron los resultados de tratamiento de aguas residuales?

Los tratamientos químicos exhiben eficiencias muy variables según el proceso aplicado y la naturaleza del contaminante, aunque en condiciones óptimas algunos sistemas alcanzan remociones de hasta 99,9 % [5]. Los procesos Fenton y electro-Fenton destacan por su elevado rendimiento: varias investigaciones reportan reducciones superiores al 90 % en DQO y DBO, así como la eliminación total de coliformes [12, 16, 19, 22]. La electrocoagulación (EC), por su parte, logra remociones de color cercanas al 94 % y, cuando se acopla con carbón activado granular (GAC), eleva la eliminación de DQO hasta 82,4 % [10, 17]. Sistemas basados en coagulación con PAC o en combinaciones sonicación-EC han alcanzado entre 62 % y 75 % de remoción de DQO, COT y nitrógeno total [6, 8]. Otros métodos que generan radicales sulfato e hidroxilo obtienen eficiencias de hasta 76,4 % en DQO y 88,9 % en p-anisidina [20]. Las configuraciones más avanzadas, por ejemplo, Fenton + PVA o PAC + peroxi-sonicación superan el 95 % de remoción en grasas, DQO, DBO y SST [13]. No obstante, ciertos sistemas menos optimizados llegan apenas al 30–40 % de reducción en DQO y COT [14, 24]. En conjunto, la evidencia confirma que las combinaciones de procesos ofrecen mejores resultados que las tecnologías individuales, especialmente cuando se tratan efluentes con alta carga orgánica y toxicidad.

La eficiencia se cuantifica principalmente mediante la Demanda Química de Oxígeno (DQO), indicador de la carga orgánica global. Otros parámetros relevantes incluyen DBO₅, Carbono Orgánico Total (COT/TOC), Sólidos Suspendidos Totales (SST), turbidez, conductividad, coliformes fecales, pH, nitrógeno total (TN) y fósforo total (TP) [7, 12, 14, 15, 18, 19, 20, 26]. En estudios electroquímicos se emplea con frecuencia la relación C/C₀ (concentración final/inicial) para describir la degradación de contaminantes [24]. La comparación sistemática de los valores previos y posteriores al tratamiento permite estimar la remoción porcentual de cada parámetro.

La elección de métricas y condiciones experimentales varía según la industria: las destilerías emplean trenes UV + AC + EF para afrontar cargas extremas de DQO [19]; la industria textil apuesta por procesos electro-Fenton para decolorar y mineralizar colorantes [6]; y los trabajos con electrocoagulación analizan variables como tiempo de reacción, tipo de electrodo, densidad de corriente (mA cm⁻²) y aditivos (Na₂SO₄, GAC) [17]. En sistemas Fenton avanzados se reportan intervalos típicos de remoción de DQO del 89–94 %, TOC del 66–76 % y DBO₅ de hasta 94 % [20]. Estas cifras confirman que la optimización de las condiciones operativas

pH, dosis de reactivos, la energía aplicada es decisiva para maximizar la eficiencia de los tratamientos químicos de aguas residuales.

¿Qué tipos de sistema de tratamiento químico en aguas residuales se han aplicado?

En la industria textil, cuyas aguas residuales se distinguen por su carácter altamente recalcitrante, las tecnologías combinadas han superado claramente a los procesos unitarios. El tren electrocoagulación + electro-oxidación (EC–EO) eliminó el 99,91 % del colorante Congo Red, muy por encima de la eficiencia de la EC sola (80 %) y de la EO sola (45 %) [5]. Aún mejores resultados se obtuvieron con la secuencia EC + EO + adsorción en carbón activado (AC), que alcanzó la remoción total del contaminante [15]. De forma análoga, el tratamiento UV + AC + electro-Fenton (EF) logró también un 100 % de eliminación con un consumo energético de apenas 4 kWh m⁻³ [17]. Experimentos adicionales muestran que el electro-Fenton heterogéneo soportado en zeolita Y-nZVI remueve el 91,3 % del colorante, mientras que la electrocoagulación sonicada reduce la relación C/C₀ a 0,145 para DQO y a 0,228 para nitrógeno amoniacal, superando a la EC convencional [10, 16].

La industria farmacéutica, caracterizada por vertidos con compuestos orgánicos recalcitrantes, también se beneficia de combinaciones avanzadas. Tanto el esquema Fenton + EC como el sistema UV + AC + EF han demostrado mineralización casi completa, con reducciones drásticas de COT y DQO y remoción total de los contaminantes diana, todo ello con un consumo energético optimizado [11, 17].

En la industria azucarera, donde la complejidad del efluente es menor, la relación costo-beneficio resulta determinante. Aquí, la combinación coagulación química + Fenton alcanza una remoción de DQO del 92,4 % a un costo operativo de 19,16 USD m⁻³, lo que convierte a este tren de tratamiento en una alternativa particularmente competitiva para plantas con restricciones presupuestarias [19].

En conjunto, estas evidencias confirman que las estrategias híbridas, especialmente aquellas que integran coagulación o electrocoagulación con procesos de oxidación avanzada, superan sistemáticamente a los métodos individuales, ya sea por su mayor eficacia de remoción, su menor consumo energético o su mejor relación costo-eficiencia, según el perfil específico de cada efluente industrial.

TABLA 3
SISTEMAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES

Sistema de Tratamiento	Contaminantes Tratados	Industria Aplicable	Observaciones Clave
EC + EO (Electrocoagulación + Electro oxidación)	Cr (Cromo)	Textil, galvanoplastia	Mucho más eficaz que EC (80%) o EO (45%) por separado
Persulfato activado (70 °C)	Color, DQO	Textil, farmacéutica	Alta eficiencia en oxidación de colorantes resistentes
Digestión anaeróbica (DA)	DQO, DBO	Agroindustria, azucarera	Bajos costos, limitado para cargas elevadas o recalcitrantes
Coagulación + Electro-Fenton	DQO, TDS	Textil, farmacéutica	Superior a métodos biológicos tradicionales
Electro-Fenton heterogéneo (zeolita Y-nZVI)	DQO, orgánicos recalcitrantes	Farmacéutica, química fina	Uso de catalizadores sólidos mejora eficiencia
EC + EO + AC (Carbón Activado)	DQO, COT, color	Textil, farmacéutica	Mayor eficiencia general, alta mineralización
Electrocoagulación (Fe-Cu)	DQO, SST	Textil, alimentaria	Combinación metálica mejora remoción de sólidos
Coagulación + Fenton	DQO, SST, turbidez	Textil, farmacéutica	Equilibrio entre eficiencia y costo (\$19.16/m ³)
Fenton + EC	DQO, SST	Textil, petroquímica	Alta eficiencia en aguas complejas
Electrocoagulación + Sonicación	DQO, nitrógeno amoniacal	Textil, agroindustria	Mejora la eficiencia de EC sola
UV + AC + Electro-Fenton (UV+AC+EF)	DQO, color, COT	Textil, farmacéutica	Alta mineralización con consumo de 4 kWh/m ³

ECP-N (Electrocoagulación por pulsos negativos)	DQO, pH, TOC	Variada	Más eficiente comparado con otras variantes
Persulfato térmico (2ª muestra)	DQO, color	Textil, farmacéutica	Potencial oxidante con activación térmica

IV. DISCUSIÓN

La revisión sistemática confirma que los procesos de oxidación avanzada (AOP) —en particular Fenton, electro-Fenton y sus variantes asistidas por radiación UV— son las tecnologías químicas más citadas para el tratamiento de aguas residuales industriales [3, 8, 12, 15–17, 20, 24, 25]. Les siguen en frecuencia la coagulación-floculación convencional [2, 4, 11, 18, 21, 23] y la electrocoagulación (EC) [10–12, 14, 18]. La selección del método depende del sector y de los contaminantes predominantes: en la industria textil se prefieren los AOP por la elevada DQO y la presencia de colorantes [11, 19, 22]; en la farmacéutica destaca el electro-Fenton debido a la baja biodegradabilidad de sus compuestos [16]; y en minería resulta eficaz la electrocoagulación para eliminar reactivos orgánicos y metales [24].

Independientemente del rubro, las etapas básicas comprenden ajuste de pH, dosificación de reactivos, oxidación química, sedimentación y verificación de parámetros como la DQO [8, 12, 15, 18, 22, 25]. No obstante, los mejores resultados se obtienen con sistemas híbridos. Entre las combinaciones más habituales figuran coagulación-floculación + adsorción [14], coagulación química + electro-Fenton [2], y ternas complejas como EC + EO + carbón activado (AC), que superan el 90 % de remoción de DQO y SST [4, 12, 20]. También sobresalen Fenton + fotocatalisis [3], electro-Fenton con radiación UV y adsorción (UV + AC + EF) [17], y EC asistida por sonicación [8].

Las eficiencias varían desde valores modestos (< 40 %) hasta la mineralización casi total de la carga orgánica, según el esquema empleado. Los trenes EC + EO alcanzan reducciones de contaminantes de hasta 99,9 % [7]; el Fenton convencional logra 55–90 % de reducción de DQO y cerca del 90 % de eliminación de color [3, 8], mientras que el electro-Fenton suele superar el 79–90 % de DQO, el 88 % de DBO y elimina por completo los coliformes [2, 3]. La EC sonicada reporta alrededor del 76 % de DQO y el 70 % de nitrógeno amoniacal [12]; la combinación EC + AC eleva la remoción de DQO de 78 % (EC sola) a 82 % [4]. La coagulación-floculación con PAC ofrece remociones intermedias (≈ 63 % de DQO, ≈ 44 % de COT) [10], pero la adición de coagulantes poliméricos (FeCl₃/PVA) puede superar el 97 % de DQO, DBO y grasas, junto con el 97 % de SST [20]. Procesos avanzados como la peroxi-coagulación o los AOP basados en persulfato activado

informan reducciones de DQO superiores al 87 % [9], mientras que las etapas de adsorción o los tratamientos biológicos previos muestran eficiencias más bajas (30–50 %) [8].

El análisis sectorial refuerza estas tendencias. En textiles, configuraciones como UV + AC + EF o EC + EO + AC, así como el uso de persulfato activado, logran remociones totales de color y DQO [4, 15, 17, 25]. En la industria farmacéutica, el electro-Fenton heterogéneo y el persulfato térmicamente activado superan el 90 % de eficiencia [8, 25]. Para el sector alimentario/azucarero, la coagulación-Fenton equilibra costo y eficiencia al alcanzar el 92,4 % de remoción de DQO con un coste de 19,16 USD m⁻³ [13]. Finalmente, en minería o efluentes altamente cargados, combinaciones como Fenton + EC o EC sonificada superan el 98 % de DQO y el 99 % de SST [19, 24].

V. CONCLUSIONES

Los resultados confirman que los tratamientos químicos más eficaces para las aguas residuales industriales son los que integran tecnologías avanzadas de oxidación —Fenton, electro-Fenton y UV-Fenton— con etapas complementarias de electrocoagulación, adsorción en carbón activado o persulfato activado térmicamente. Estos trenes híbridos superan el 90 % de remoción e incluso alcanzan valores cercanos al 100 % en indicadores clave como DQO, DBO, color, contaminantes recalcitrantes y coliformes, muy por encima de las eficiencias obtenidas con procesos unitarios. La selección de la configuración óptima varía según el sector y la complejidad del efluente: resulta especialmente ventajosa en industrias textil, farmacéutica y agroindustrial, donde la carga orgánica y la toxicidad son elevadas. La evaluación del desempeño mediante parámetros como DQO, COT y la relación C/C₀ asegura un control preciso de la eficacia. En conjunto, estas evidencias posicionan a los tratamientos químicos avanzados como una solución robusta, adaptable y rentable para la eliminación de contaminantes complejos en efluentes industriales.

REFERENCIAS

[1] U. Hübner et al., "Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – Guidance for systematic future research," *Heliyon*, May 15, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e30402.

[2] E. Bazrafshan et al., "Slaughterhouse wastewater treatment by integrated chemical coagulation and electro-Fenton processes," *Sustainability*, vol. 14, no. 18, Sep. 2022, doi: 10.3390/su141811407.

[3] M. Mohammadi, R. Davarnejad, and M. Sillanpää, "A novel catalyst based on zero-valent iron nanoparticles for assisting electro-Fenton process applied to a toxic wastewater," *Results in Engineering*, vol. 24, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102938.

[4] M. K. Öden, "Evaluation of model and process optimization for the treatment of drilling wastewater using electrocoagulation," *Molecules*, vol. 30, no. 5, Mar. 2025, doi: 10.3390/molecules30051064.

[5] C. Mamédio et al., "The PICO strategy for the research question construction and evidence search," in **23rd LACCEI International MultiConference for Engineering, Education, and Technology**, Mexico City, Jul. 16–18, 2025.

[6] M. J. Page et al., "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, Mar. 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.

[7] R. A. Jasim and R. H. Salman, "Use of nano Co-Ni-Mn composite and aluminum for removal of artificial anionic dye Congo red by combined system," *Ecological Engineering and Environmental Technology*, vol. 25, no. 7, pp. 133–149, 2024, doi: 10.12912/27197050/188266.

[8] N. Pani et al., "Electrocoagulation followed by sound agitation for removal of nitrogen and carbon-based pollutants from industrial wastewater," *Water Science and Technology*, vol. 86, no. 11, pp. 2861–2877, Dec. 2022, doi: 10.2166/wst.2022.364.

[9] M. Akhtar et al., "Simultaneous biomethane optimization and wastewater treatment using isolated acclimatized bacterial strains in baker yeast effluent," *Environmental Engineering Research*, vol. 30, no. 1, May 2024, doi: 10.4491/eer.2024.130.

[10] S. Metin and D. İ. Çifçi, "Chemical industry wastewater treatment by coagulation combined with Fenton and photo-Fenton processes," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 98, no. 5, pp. 1158–1165, May 2023, doi: 10.1002/jctb.7321.

[11] A. Panhwar and S. Bhutto, "Improved reduction of COD, BOD, TSS and oil & grease from sugarcane industry effluent by ferric chloride and polyaluminum chloride coupled with polyvinyl alcohol," *Ecological Engineering and Environmental Technology*, vol. 22, no. 2, pp. 8–14, 2021, doi: 10.12912/27197050/133332.

[12] I. Dobrosz-Gómez, M. Á. Gómez-García, and E. Gil-Pavas, "Efficient treatment of textile wastewater by sequential electrocoagulation, electrochemical oxidation, and adsorption: Optimization and toxicity evaluation," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 873, 2020, doi: 10.1016/j.jelechem.2020.114578.

[13] H. Srikantha, M. Shivaswamy, and S. Mahesh, "Batch electrochemical coagulation of real textile wastewater using Cu-SS and SS-Cu electrode combinations and its settleability aspects," *Water Science and Technology*, vol. 82, no. 7, pp. 1467–1483, Oct. 2020, doi: 10.2166/wst.2020.426.

[14] E. Güneş et al., "Removal of COD, aromaticity and color of a pretreated chemical producing industrial wastewater: A comparison between adsorption, ozonation, and advanced oxidation processes," *Turkish Journal of Chemistry*, vol. 45, no. 3, pp. 551–565, 2021, doi: 10.3906/kim-2010-48.

[15] C. Vicente et al., "Combined electrocoagulation and physicochemical treatment of cork boiling wastewater," *Sustainability*, vol. 14, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/su14073727.

[16] C. P. Calvo et al., "Reduction of COD and TOC concentration in pharmaceutical wastewater using Fe²⁺ catalyzed ozone: Full-scale case study," *Applied Chemical Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 111–116, 2022, doi: 10.24294/ace.v5i2.1646.

[17] A. Perumal et al., "Photo-alternating current-electro-Fenton process for pollutant removal and energy usage from industrial wastewater: Response surface approach optimization of operational parameters," *ChemElectroChem*, vol. 10, no. 12, Jun. 2023, doi: 10.1002/celec.202300086.

[18] M. Sobczak, S. Bujnowicz, and L. Bilińska, "Fenton and electro-Fenton treatment for industrial textile wastewater recycling: Comparison of byproducts removal," *Water Resources and Industry*, vol. 31, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.wri.2024.100256.

[19] I. Dobrosz-Gómez et al., "Environmental and economic evaluation of the sequential combination of coagulation–flocculation with different electroFenton-based configurations for the treatment of raw textile wastewater," *Water*, vol. 16, no. 15, Aug. 2024, doi: 10.3390/w16152154.

[20] A. Ali et al., "Application of effluent reduction methods and treatment using advanced oxidation process at leather chemicals and tanning industries," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 12, 2024, doi: 10.3389/fenvs.2024.1422107.

[21] N. Pani et al., "Simultaneous removal of COD and ammoniacal nitrogen from dye intermediate manufacturing industrial wastewater using Fenton oxidation method," *Applied Water Science*, vol. 10, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.1007/s13201-020-1151-1.

- [22]N. K. Chaturvedi and S. S. Katoch, "Effect of various parameters during degradation of toxic p-anisidine by Fenton's oxidation," *Applied Water Science*, vol. 10, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.1007/s13201-019-1106-6.
- [23]R. Suresh et al., "Experimental analysis on the synergistic effect of combined use of ozone and UV radiation for the treatment of dairy industry wastewater," *Environmental Engineering Research*, vol. 26, no. 5, Oct. 2021, doi: 10.4491/eer.2020.375.
- [24]G. Jing et al., "Electrocoagulation: A promising method to treat and reuse mineral processing wastewater with high COD," *Water*, vol. 12, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.3390/w12020595.
- [25]E. Güneş et al., "Process characterization and pretreatment of container and drum cleaning industry wastewater using a heat-activated persulfate oxidation process," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 51, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.1002/clen.202200365..