

Aplicación de procesos electroquímicos de oxidación avanzada acoplados para el tratamiento de aguas residuales de curtiduría

Herrera-Chávez Sonia¹, Montañez-Cervantes Alicia Monserrat¹, Bravo-Jiménez Vianey Guadalupe de Jesús¹, Vázquez-Díaz Martha Alejandra², Peralta-Hernández Juan Manuel¹

¹División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, ²Instituto Tecnológico Superior de la Región Sierra.

Resumen

Los procesos electroquímicos de oxidación avanzada (PEOA) se han aplicado ampliamente en el tratamiento de la degradación de contaminantes orgánicos. La presente revisión proporciona información referente a los sistemas de acoplamiento sobre PEOA y diferentes oxidantes (Entre ellos, persulfato (PS), ozono (O₃), membranas, procesos biológicos, electrocoagulación), aplicados para la degradación de compuestos orgánicos presentes en efluentes de la industria de la curtiduría. Los resultados muestran las condiciones de reacción y la ventaja en cuanto a eficiencia de degradación y mineralización de los sistemas acoplados frente a los métodos individuales.

Palabras clave: Electro-Fenton; electrooxidación; procesos electroquímicos de oxidación avanzada; colorantes.

Introducción

La industria del curtido es uno de los sectores económicos más importantes en muchos países como en México, sin embargo, se estima que cada año produce más de 300 millones de toneladas de aguas residuales y 64 320 t de lodos en el mundo [1], La descarga no tratada de estos efluentes de tenerías que contienen alto contenido de carbono orgánico total (COT), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), cromo trivalente, sulfuro, cloruros, calcio, magnesio, amoníaco, iones de metales pesados y una amplia variedad de compuestos orgánicos incluidos colorantes y tintes azoicos, impacta no solo en los aspectos estéticos, sino que también daña la biota, ecosistema y en última instancia aumenta el riesgo para la salud de seres humanos por contaminación del agua subterránea. [2]

Los tintes azoicos representan alrededor del 70% de la producción mundial y se utilizan ampliamente en las industrias textiles y de curtiduría, se ha informado que la industria de curtiduría sola descarga el 8% del total de efluentes contaminados con tintes, una cantidad lo suficientemente significativa como para darle prioridad para la remediación. Los tintes tipo azo contienen uno o más enlaces azo (-N=N-) como grupo cromóforo en asociación con estructuras aromáticas que contienen grupos funcionales como OH y SO₃H, son altamente tóxicos para los microorganismos acuáticos, cancerígenos y mutágenos para los seres humanos. Dado que los tintes sintéticos no se pueden degradar eficientemente con los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales (entre ellos fotólisis, electrocoagulación, sonólisis, ozonización, fotocatalisis, filtración por membrana, etc.), en años recientes se han probado su eficiencia al acoplarse a diferentes procesos electroquímicos de oxidación avanzada (PEOA). [3,5]

Los procesos electroquímicos de oxidación avanzada son tecnologías poderosas para la remediación de aguas residuales que contienen contaminantes orgánicos recalcitrantes. Aunque los PEOA incluyen diferentes sistemas de reacción, sus mecanismos se caracterizan básicamente por la generación in situ de radicales hidroxilo altamente reactivos y no selectivos, capaces de oxidar y mineralizar casi todos los compuestos orgánicos a CO₂, agua e iones inorgánicos. Entre los PEOA disponibles, los procesos oxidación anódica, electro-Fenton y fotoelectro-Fenton son de especial interés porque ofrecen altos rendimientos de reacción logrando las calidades de agua deseadas, aunque a menudo suelen ser costosos en términos de inversión en equipo, necesidad de energía o uso de reactivos químicos adicionales, su acoplamiento a prácticas convencionales podría incrementar su rentabilidad respecto al uso de técnicas individuales. La selección de un tratamiento para la purificación de aguas residuales es compleja, por lo que el diseño de uno o más procesos en acoplamiento es una situación que dependerá de la calidad del efluente a tratar, de las normas que deba cumplir, del tratamiento más eficaz y del menor costo razonable, entre otros. [4]

En el presente trabajo se hace referencia a los antecedentes generales y estudios realizados de los procesos electroquímicos de oxidación avanzada acoplados para el tratamiento de agua de curtiduría reportados en la literatura.

Metodología

Se realizó una investigación bibliográfica mediante el análisis de material científico publicado sobre avances recientes en los procesos electroquímicos de oxidación avanzada acoplados. La información académica data de la última década y describe aquellos estudios enfocados al tratamiento de aguas residuales de curtiduría. Se utilizaron las siguientes palabras clave para la búsqueda en las bases de datos: oxidación anódica, electro-fenton, fotoelectro-fenton (acoplados). Los criterios para la selección de informes en esta revisión fueron los siguientes: (i) PEOA acoplados a persulfato, (ii) PEOA acoplados a ozono y peroxono, (iii) PEOA acoplados a electrocoagulación (iv) PEOA acoplados a procesos biológicos y (v) PEOA acoplados a membranas. La información para el desarrollo de los subtemas se obtuvo de artículos científicos, tesis de pregrado y posgrado y libros científicos consultando las bases de datos académicas SCOPUS, Web of Science, SCIELO y Google Scholar.

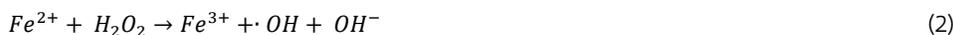
Resultados y Discusión

Procesos electroquímicos de oxidación avanzada (PEOA)

Entre los PEOA se encuentran la electrooxidación u oxidación anódica (OA) y los métodos electroquímicos indirectos basados en la química de reacción de Fenton con la producción electroquímica de H_2O_2 (como electro-Fenton (EF) y fotoelectro-Fenton (PEF) (Figura 1). El experimento más sencillo, la *electrooxidación* u *oxidación anódica* (OA), se fundamenta en la acción del $\cdot OH$ fisisorbido en la superficie del ánodo como producto intermedio de la oxidación del agua a O_2 . (Ec. 1) [1]



El poder oxidante del H_2O_2 es incrementado en una solución ácida con presencia de iones Fe^{2+} y alimentación con O_2 , reacción conocida como electro-Fenton, (EF) (Ec. 2).



La eficiencia del proceso EF puede mejorarse irradiando luz UV o solar en una $\lambda_{max}=360$ nm, correspondiendo al proceso denominado Fotoelectro-Fenton (FEF). La radiación UV mejora la tasa de degradación de los compuestos orgánicos debido a dos acciones en paralelo (i) el incremento de producción de radicales $\cdot OH$ producto del efecto sobre la fotólisis de $Fe(OH)^{2+}$, (Ec.3), y (ii) la fotodecarboxilación de complejos de carboxilato de $Fe(III)$ originados (Ec. 4) [1,7]

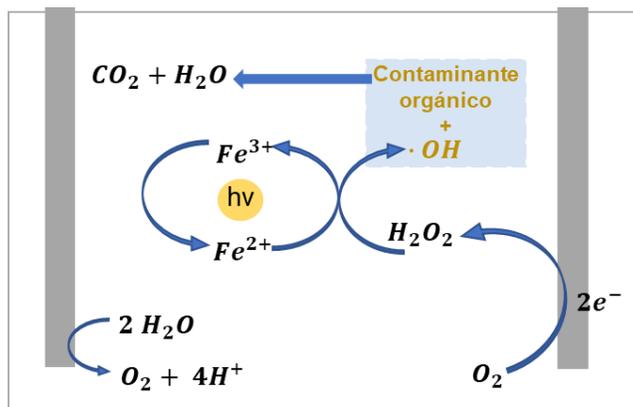


Figura 1. Mecanismo de reacción, procesos de electro-Fenton (EF) y fotoelectro-Fenton (FEF).

Procesos electroquímicos de oxidación avanzada acoplados

a) PEOA-Persulfato (PS)

Los iones sulfato en los PEOA se pueden presentar naturalmente en los efluentes a tratar o pueden adicionarse como electrolito soporte a fin de incrementar la conductividad iónica. Generalmente, el $\text{SO}_4^{\bullet-}$ puede oxidar más rápidamente que $\bullet\text{OH}$ dado que es más propenso a la reacción de transferencia de electrones, generando especies catiónicas orgánicas que se oxidan rápidamente permitiendo así la degradación de compuestos persistentes y estables frente al radical hidroxilo. [8] Los estudios encontraron que el sistema de persulfato electroactivado acoplado a PEOA es una forma eficaz para el tratamiento de efluentes con tintes orgánicos; J. Wu *et al* [9] estudió la oxidación electroquímica del colorante Naranja ácido 7 (OA7) por el sistema acoplado con peroxisulfato y iones ferroso ($\text{Fe}^{2+}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$), los resultados mostraron la eficiencia de decoloración producto del incremento en la concentración de $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ y iones Fe^{2+} , degradándose casi en condiciones óptimas para una densidad de corriente de $16,8 \text{ mAcm}^{-2}$, a temperatura ambiente, pH 3 y concentración de $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ de 4 mM. (Tabla II)

Además, otros autores presentaron los procesos de oxidación electroquímica avanzada acoplados al uso de peroxisulfato activado (PDS), Zhang *et al* [10] muestra la decoloración de AO7 en solución acuosa por este proceso con Fe_2O_4 en un reactor electroquímico (procesos Electro/ Fe_2O_4 /PDS) alcanzando porcentajes de decoloración de 98,0% a 95,3%.

b) PEOA-ozono (O_3) y PEOA-peroxono

El ozono es una sustancia química con capacidad como fuerte agente oxidante dependiente del pH, la generación de radicales hidroxilo a través de ozono ha sido muy útil para su uso en procesos de oxidación avanzada (POA), sin embargo, se ha identificado que ciertos compuestos orgánicos tratados con ozono pueden degradarse a compuestos más tóxicos, por lo que el tratamiento con ozono en forma individual no es eficiente y se ha recurrido al acoplamiento con PEOA o POA [4]. Amado-Piña *et al* [11] reporta el estudio de la degradación de fenol, agente sintético empleado en la curtiduría, bajo los ambientes químicos de OA, O_3 y ozonización-oxidación anódica descubriéndose que el proceso acoplado mineraliza prácticamente la concentración total de fenol (eliminación de $\text{TOC}=99,8\%$) en condiciones de pH 7,0, $j=60 \text{ mAcm}^{-2}$ y concentración de ozono de $5\pm 0,5 \text{ mg/L}$ a temperatura ambiente tras 60 min de reacción, frente al tratamiento con procesos en individual que mostraron una mineralización aproximadamente dos veces más lenta del fenol. (reducción de TOC a 120 min. de 39,7% y 92,1% para, O_3 y OA, respectivamente).

Por otra parte, los PEOA acoplados a peroxono ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$) tiene un efecto sinérgico importante para la mineralización orgánica, el acoplamiento con un proceso electroquímico avanzado permitiría impulsar esta reacción por uso del H_2O_2 electrogenerado in situ. Estudios recientes sobre los sistemas PEOA-peroxon han empleado diversos compuestos incluidos tintes orgánicos (p. Ej, Naranja II) [12,13], como se muestra en Tabla II.

c) PEOA-Electrocoagulación (EC)

La electrocoagulación es un proceso efectivo para desestabilizar finamente las partículas dispersas en el agua residual, generalmente emplea electrodos de hierro o aluminio que al ser sometidos a una corriente eléctrica los ánodos producen iones de hierro (Fe^{2+}) o (Al^{3+}) capaces de coagular especies de interés o de hidrolizarse cerca del ánodo para producir una serie de intermediarios activados que son capaces de desestabilizar las partículas dispersas presentes en el agua y formar flóculos que finalmente flotaràn por efecto de las pequeñas burbujas de hidrógeno generadas en el cátodo. (Eq. 5-8). [1]



En el cátodo:



Se ha reportado un tratamiento electroquímico acoplado con electrocoagulación para aguas residuales del parque Industrial Toluca-Lerma con eficiencias de remoción de color de hasta 99%, 97% turbidez y 99% de DQO [18] Asimismo procesos acoplados empleando celdas Fe/Fe seguida de un post tratamiento con FEF en celdas tipo tanque agitado de DDB/DDB muestran buenos decaimientos de los contaminantes de efluentes respecto al uso de técnicas individuales de OEA. (Tabla I) [1]

Tabla 1. Eficiencia del acoplamiento de electrocoagulación-FEF, en comparativa con técnicas individuales de OA, EF, FEF, EC.[1]

Sistema	Condiciones de reacción	t (min)	%TOC removido	Ref.
EC	j= 65 mAcm ⁻² , Reactor tipo tanque agitado Fe/Fe.	180	54.5	1
OA	j= 65 mAcm ⁻² , Reactor tipo tanque agitado, electrodos Fe/DDB.	180	48,5	1
EF	j= 65 mAcm ⁻² , reactor tipo tanque agitado, electrodos DDB/DDB	180	30	1
FEF	j= 65 mAcm ⁻² , reactor tipo tanque agitado, electrodos DDB/DDB	180	58,8	1
EC/FEF	j= 65 mAcm ⁻² , reactor tipo tanque agitado, FEF: electrodos DDB/DDB, EC: Fe/Fe	90/90	78,5%	1

d) PEOA- acoplados a tratamientos biológicos

Ya sea como acoplamiento pre o post biológico, el acoplamiento Fenton/biológico resulta ser uno de los métodos más efectivos para el tratamiento de aguas con compuestos orgánicos tóxicos o recalcitrantes (p. Ej. compuestos alifáticos, nitroaromáticos, fenoles, clorobenceno y colorantes tipo azo) siendo una alternativa de mejora para los sistemas convencionales dado que los procesos de Fenton han demostrado incrementar a bajo costo el índice de biodegradabilidad (IB) de muchos tintes orgánicos por la acción no selectiva del HO[•] al generar compuestos intermediarios de menor tamaño molecular. [4,14]

Para efectuar un proceso Fenton acoplado a un tratamiento biológico convencional es importante considerar un análisis preliminar que defina el valor inicial del IB, la toxicidad, el contenido de nitrógeno amoniacal y la presencia de metales pesados. El acoplamiento de los tratamientos Fenton/biológico será eficiente únicamente ante IB bajos. “Cuando los valores de toxicidad del IB sean menores al 10% y mayor a 0.6 respectivamente, no se recomienda un tratamiento Fenton previo. Si el rango es de 10-50% de toxicidad y de 0.2-0.5 de IB, se recomienda realizar una dilución con algún otro tipo de agua residual municipal o con menor toxicidad y volver a evaluar, si estos rangos de toxicidad e IB continúan, se requiere del acoplamiento”. (Barrera, 2020, p.212)

El desarrollo de pruebas de optimización que determinen las condiciones de trabajo acorde al tipo de efluente y tratamiento biológico con el que se desea acoplar (concentración de peróxido, catalizador, tiempo de tratamiento, pH, tipo de electrodos) permitirían favorecer el incremento del IB y la disminución de la toxicidad (4), ensayos con parámetros bien controlados han reportado desintoxicaciones de efluentes con remociones de hasta 93% de OTC y eliminación de *Escherichia coli* > 99%. [14]

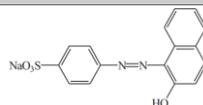
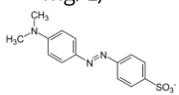
e) PEOA-Membranas

Finalmente, la tecnología de membranas se ha considerado como uno de los métodos más prometedores para la descontaminación del agua debido a sus ventajas de alta selectividad de separación, bajo consumo de energía, sin requisitos de productos químicos adicionales, fácil escalado y funcionamiento continuo, sin embargo al tratarse de un proceso físico en efluentes con composiciones químicas complejas, la retención completa de los contaminantes suele ser difícil o poco práctica ocasionando la retención y acumulación de contaminantes en la superficie/interior de la membrana (efecto denominado ensuciamiento de membrana). Para ello, en la última década, se han informado de muchos estudios sobre diseños sinérgicos de proceso de acoplamiento de tecnología de membranas y PEOA (membrana-PEOA) que permitan mitigar eficazmente estas limitantes y mejorar el rendimiento general de separación. [16].

Li *et al.* [15] reporta una revisión de los estudios sobre membrana-OA para el tratamiento de aguas residuales de tintes, una de las tecnologías descritas combina las ventajas de ambos tratamientos al colocar cada electrodo de un lado de la membrana conectados a una corriente continua permitiendo la degradación de partículas de tinte por (i) transferencia directa de electrones a la superficie del ánodo y por (ii) transferencia de oxígeno de las moléculas de aguas descargadas al OH adsorbido en la superficie del ánodo. Debido a esta conexión se sufre un mayor consumo de energía, implementación comercial y volumen de reactor, por lo que actualmente el diseño de nuevas membranas conductoras tiene un doble propósito, actuar como barrera de separación y como electrodo para el proceso de OA.

El proceso de EF también se puede acoplar a membranas, Liang *et al.* [17] evidencia el interés de acoplar el proceso de oxidación electroquímica avanzada (EF) a la tecnología de filtración dinámica, utilizando una membrana tubular de grafito de carbono electroquímicamente reactivo, actuando como cátodo, este acoplamiento resulta adecuado para confinar la contaminación orgánica mientras se logra la degradación completa de moléculas refractarias (naranja ácido 07 como contaminante modelo).

Tabla 2. Revisiones para diferentes condiciones de tratamiento de tintes orgánicos utilizando procesos de oxidación electroquímica avanzada-acoplados.

Sistema	Efluente	Condiciones de reacción	Eficiencia de degradación	Ref.
EC/Fe ²⁺ /PS	Naranja Ácido 7 (0,1 mmol/L)	pH 3, $j = 16,8 \text{ mAcm}^{-2}$, [Fe ²⁺] = 1mM, [S ₂ O ₈ ²⁻] = 4 mM, [Na ₂ SO ₄] = 0,1 M, T= 20°C. Ánodo (An): Ti/RuO ₂ -IrO ₂ , Cátodo (cat): Fe ²	Decoloración del 96,5%, Remoción de DQO 57,6% tras 60 min.	9
Electro/Fe ₂ O ₄ /PS	 Naranja Ácido 7 (0,1 mmol/L)	pH 6, $j = 8,4 \text{ mAcm}^{-2}$, [Fe ₃ O ₄] = 0,8 g/L, [PDS] = 10 mM, [Na ₂ SO ₄] = 50 mM, An: Ti/RuO ₂ -IrO ₂ , Cát: Fe ₂ O ₄	Decoloración del 98%, en 60 min.	10
OA/O ₃	Fenol 	Ozono en fase gaseosa de 5±0,5 mgL ⁻¹ , Cat, An: DDB, pH 7, $j = 60 \text{ mAcm}^{-2}$, T= 20°C	98,5% de reducción de TOC en 60 min.	11
electro/O ₃ /H ₂ O ₂	Naranja II. (200 mg/L) 	pH 3,0-10,0, $j = 400 \text{ mA}$, concentración de entrada de O ₃ 74 mg/L, velocidad de flujo de gas 0,4L/min, An: Pt 1cm ² , Cat: Carbono-PTFE (2 cm x 5 cm), Na ₂ SO ₄] = 0,05 M	Decoloración completa tras 4 min. Mineralización COT del 95,7% a 90 min	12
OA-membrana	Amarillo ácido 36. (20 mg/L)	Electrodos BDD/Ti. Membrana cerámica. $j = 60 \text{ mAcm}^{-2}$,	Eficiencia de remoción de tinte 94,4%, Remoción COD 100%	16
OA-membrana	Naranja ácido 07 (300 mg/L)	Cátodo/Ánodo: DDB, Membrana NFT50. $j = 30 \text{ mAcm}^{-2}$, flujo 2,648 L/h/m ² bar	Remoción COD 96%	16
EF-membrana	Naranja ácido 07 (C ₁₆ H ₁₁ N ₂ O ₄ SNa) (0,1 mM)	Cátodo/ánodo: acero inoxidable, membrana tubular de grafito de carbono. $j = 1,5 \text{ mAcm}^{-2}$, flujo 65,6 L/h/m ² bar, pH 3-5.	Eficiencia de remoción de tinte 96%	17
EC-FEF	Efluente de tenería	EC, Reactor tipo tanque agitado Fe/Fe, $j = 65 \text{ mAcm}^{-2}$, 90 min, 180 min. FEF: Reactor tipo tanque agitado, pH 3,0. BDD/BDD. [Fe ²⁺] 3,0 mM, $j = 111 \text{ mAcm}^{-2}$ 90 min, 180 min.	Remoción de %TOC 78,5% (90/90 min). Remoción de %TOC 90,1% (180/180 min).	1

Conclusiones

Los estudios presentados en este trabajo son un indicativo de que existe un importante antecedente de los procesos de oxidación electroquímica avanzada acoplados a otro tipo de tratamiento convencional, ya sea físico, químico o biológico, como pretratamiento, o bien como postratamiento. La revisión proporciona estudios recientes sobre POEA-acoplados aplicados para el tratamiento de aguas de curtiduría evidenciando las ventajas y desventajas de este tipo de métodos, así como su capacidad para ejercer una catálisis sinergia durante el proceso de reacción a fin de mejorar significativamente la eficiencia de degradación y mineralización de compuestos orgánicos.

Referencias

- [1] Isarain-Chávez, E., de la Rosa, C., Godínez, L., Brillas, E. y Peralta-Hernández, J.M. (2014). *Comparative Study of Electrochemical Water Treatment Processes for a Tannery Wastewater Effluent*. Journal of Electroanalytical Chemistry, 713, 62-69
- [2] Korpe S, Bethi B., Sonawane S. H., & Jayakumar K.V., (2019). *Tannery wastewater treatment by cavitation combined with advance oxidation process (AOP)*. Ultrasonics-Sonochemistry, doi: 10.1016/j.jultsonch.2019.104723
- [3] Medrano-Rodríguez, F., Picos-Benítez, A., Brillas, E., Bandala, E. R., Pérez, T., & Peralta-Hernández, J. M. (2020). *Electrochemical advanced oxidation discoloration and removal of three brown diazo dyes used in the tannery industry*. Journal of Electroanalytical Chemistry, 114360. doi:10.1016/j.jelechem.2020.114360.
- [4] Barrera, C. E. (2014) *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. Reverté Ediciones <http://hdl.handle.net/20.500.11799/52617>
- [5] Ramírez, C., Saldaña, A., Hernández, B., Acero, R., Guerra, R., García-Segura, S., ... Peralta-Hernández, J. M. (2013). *Electrochemical oxidation of methyl orange azo dye at pilot flow plant using BDD technology*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 19(2), 571-579.
- [6] Oturan N., Brillas E., Oturan M. (2012) Unprecedented total mineralization of atrazine and cyanuric acid by anodic oxidation and electro-Fenton with a boron-doped diamond anode. Environ Chem Lett 10:165-170.
- [7] Chiva-Vicent S., Berlanga J., Martínez R., Climent J.(2017) *Procesos de oxidación avanzada en el ciclo integral del agua*. Universitat Jaume I. Unión de Editoriales Universitarias Españolas <https://cutt.ly/5mKERja>
- [8] Rodríguez, M., Barrera C. E. (2020) *Procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de agua*. Universidad Autónoma del Estado de México. <https://cutt.ly/YmkEt1B>
- [9] Wu, J., Zhang, H., & Qiu, J. (2012). *Degradation of Acid Orange 7 in aqueous solution by a novel electro/Fe²⁺/peroxydisulfate process*. Journal of Hazardous Materials, 215-216, 138-145.
- [10] Lin, H., Zhang, H., & Hou, L. (2014). *Degradation of C. I. Acid Orange 7 in aqueous solution by a novel electro/Fe³⁺/PDS process*. Journal of Hazardous Materials, 276, 182-191.
- [11] Amado-Piña, D., Roa-Morales, G., Barrera-Díaz, C., Balderas-Hernandez, P., Romero, R., Martín del Campo, E., & Natividad, R. (2017). *Synergic effect of ozonation and electrochemical methods on oxidation and toxicity reduction: Phenol degradation*. Fuel, 198, 82-90.
- [12] Bakheet, B., Yuan, S., Li, Z., Wang, H., Zuo, J., Komarneni, S., & Wang, Y. (2013). *Electro-peroxone treatment of Orange II dye wastewater*. Water Research, 47(16), 6234-6243.
- [13] Li, J., Li, Y., Xiong Z., Yao G., & Lai B. (2019) *The electrochemical advanced oxidation processes coupling of oxidants for organic pollutants degradation: A mini-review*. Chin. Chem. Lett, 30(30).
- [14] Blanco, J., Torrades, F., De la Varga, M., & García-Montaño, J. (2012). *Fenton and biological-Fenton coupled processes for textile wastewater treatment and reuse*. Desalination, 286, 394-399.
- [15] Li C., Zhang M., Song C., Tao P., Sun M., & Shao M. (2018) Enhanced Treatment Ability of Membrane Technology by Integrating an Electric Field for Dye Wastewater Treatment: A Review. Journal of AOAC International, 101(5) 1341-1352.
- [16] Pan Z., Song C., Li L., Wang H., Pan. Y., Wang C., Li J., Wang T., & Feng X. (2019) *Membrane technology coupled with electrochemical advanced oxidation processes for organic wastewater treatment: Recent advances and future prospects*. Chemical Engineering Journal. 376.
- [17] Liang, P., Rivallin, M., Cerneaux, S., Lacour, S., Petit, E., & Cretin, M. (2016). *Coupling cathodic Electro-Fenton reaction to membrane filtration for AO7 dye degradation: A successful feasibility study*. Journal of Membrane Science, 510, 182-190.
- [18] Linares-Hernández I., Martínez-Miranda V., Barrera-Díaz C., Pavón-Romero S., Bernal-Martínez L. y Lugo-Lugo V. (2011) *Oxidation of persistent organic matter in industrial wastewater by electrochemical treatments*. Avances en Ciencias e Ingeniería, 2(1),21-36.