

Diseño Óptimo de un Sistema de Tratamiento de Efluentes Acuosos Contaminados con Cromo Hexavalente Mediante una Cinética de Reducción en Estado Transitorio

Adrián López-Yañez *, Estefanía Godoy-Colin, Gastón Martínez-De Jesús, Yoyce Obando-Galicia y José Alfredo Parra-Reyes

División de Ingeniería Química y Bioquímica, TecNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico S/N, Ecatepec 55210, Estado de México, México

* Adrian López Yañez: loya8305@gmail.com; Tel.: 5514680064

Diseño de Procesos Sustentables (Simulación y Dinámica de Sistemas)

Recibido: 23 de agosto de 2025 Aceptado: 2 de octubre de 2025 Publicado: 31 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.627>

Resumen: El tratamiento de efluentes acuosos contaminados con metales pesados es un desafío prioritario en la ingeniería debido a los graves riesgos que representan para la salud y los ecosistemas. Entre ellos, el cromo hexavalente es uno de los contaminantes más peligrosos por su elevada movilidad, persistencia y bioacumulación. Su exposición prolongada provoca daños renales, hepáticos, respiratorios y efectos carcinogénicos. Las normas mexicanas establecen límites estrictos para descargas, fijando 0.5 mg/L para cromo total y valores cercanos a 0.05 mg/L en referencia a estándares internacionales. El diseño de sistemas distribuidos de tratamiento constituye una alternativa eficiente frente a esquemas centralizados, al integrar unidades modulares que reducen costos de transporte, mejoran la flexibilidad y permiten el control localizado de contaminantes. Para optimizar estos sistemas se aplican herramientas de programación matemática: lineal, no lineal, mixta-entera y dinámica, que permiten resolver balances, seleccionar tecnologías y evaluar escenarios temporales. Diversas tecnologías han mostrado eficacia en la remoción de metales pesados, destacando la precipitación química, el intercambio iónico, la adsorción y el uso de membranas. En este trabajo se empleó un proceso electroquímico documentado en la literatura científica ya que se han consolidado como métodos promisorios para el tratamiento de cromo hexavalente Cr(VI) y que permiten la reducción a cromo trivalente Cr(III), menos tóxico y más fácilmente removible. Además, se desarrolló un modelo matemático de optimización dinámica (OD) para la integración de tecnologías de tratamiento avanzadas, como los procesos electroquímicos, que permite representar un enfoque integral para el diseño de sistemas distribuidos sostenibles. Finalmente, el OD se implementó en el sistema de Matlab usando un caso de estudio académico.

Palabras clave: optimización, tratamiento, efluentes, cinética, electroquímica, reducción

Optimal Design of an Aqueous Effluent Treatment System Using Transient State Hexavalent Chromium Reduction Kinetics

Abstract: The treatment of aqueous effluents contaminated with heavy metals is a priority engineering challenge due to the serious risks they pose to health and ecosystems. Among these, hexavalent chromium is one of the most dangerous pollutants due to its high mobility, persistence, and bioaccumulation. Prolonged exposure causes kidney, liver, and respiratory damage, as well as carcinogenic effects. Mexican regulations establish strict limits for discharges, setting 0.5 mg/L for total chromium and values close to 0.05 mg/L in reference to international standards. The design of distributed treatment systems constitutes an efficient alternative to centralized systems, by integrating modular units that reduce transportation costs, improve flexibility, and allow for localized control of pollutants. To optimize these systems, linear, nonlinear, mixed-integer, and dynamic mathematical programming tools are applied, allowing for the resolution of balances, the selection of technologies, and the evaluation of time-based scenarios. Various technologies have proven effective in removing heavy metals, including chemical precipitation, ion exchange, adsorption, and membranes. This work used an electrochemical process from the scientific literature, as they have proven promising methods for treating hexavalent chromium (Cr(VI)) and allow its reduction to trivalent chromium (Cr(III), which is less toxic and more easily removable). Furthermore, a dynamic optimization mathematical model (DO) was developed for the integration of advanced treatment technologies, such as electrochemical processes, which provides a comprehensive approach to the design of sustainable distributed systems. Finally, the DO was implemented in Matlab using an academic case study.

Keywords: optimization, treatment, effluents, kinetics, electrochemistry, reduction

Introducción

El tratamiento de efluentes acuosos es un desafío crucial en la ingeniería ambiental, particularmente cuando estos contienen metales pesados de alta toxicidad. Entre ellos, el cromo en su estado hexavalente (Cr(VI)) se reconoce como uno de los contaminantes más peligrosos debido a su alta movilidad en medios acuosos superficiales y subterráneos,

su persistencia ambiental y su capacidad de bioacumulación, afectando tanto la biodiversidad acuática como la calidad de los recursos hídricos para consumo humano e industrial (Owlad *et al.*, 2009). La exposición prolongada a Cr(VI) produce efectos adversos severos en la salud humana, que incluyen daño renal y hepático, alteraciones respiratorias, dermatitis crónica, así como un alto potencial cancerígeno (Kimbrough *et al.*, 1999; ATSDR, 2012).

En México, el marco normativo más actualizado sobre descargas de aguas residuales se encuentra en la NOM-001-SEMARNAT-2021, donde se establecen límites máximos permisibles para contaminantes prioritarios, incluyendo metales pesados. Para el caso del cromo, los valores de referencia dependen del tipo de cuerpo receptor y del uso del agua. En general, el límite máximo permitido para cromo total se fija en 0.5 mg/L para descargas en cuerpos receptores de agua dulce de uso público, mientras que para cromo hexavalente los valores tienden a ser más estrictos (SEMARNAT, 2021; WHO, 2017). Estas disposiciones reflejan la importancia de implementar tecnologías de tratamiento avanzadas y optimizadas que garanticen el cumplimiento normativo y la protección de la salud pública y ambiental.

El desarrollo de sistemas distribuidos de tratamiento de efluentes acuosos se presenta como una estrategia prometedora para enfrentar este reto. A diferencia de los sistemas centralizados, los esquemas distribuidos permiten la integración flexible de unidades de tratamiento en distintos puntos de la red de generación de aguas residuales, lo que favorece la reducción de costos de transporte, la mejora en la eficiencia operativa y la posibilidad de un control localizado de contaminantes específicos (El-Halwagi, 2017). En el caso particular de los metales pesados, esta aproximación permite diseñar combinaciones de operaciones unitarias (precipitación química, intercambio iónico, adsorción en materiales avanzados, membranas selectivas, entre otras) de manera modular y escalable (Fu & Wang, 2011).

Para lograr un diseño eficiente de estos sistemas, se emplean técnicas de programación matemática que permiten evaluar de forma sistemática múltiples configuraciones y escenarios operativos. Dentro de este marco, se distinguen diversas herramientas: la programación lineal (LP) resulta útil para problemas donde las relaciones entre variables son proporcionales y lineales; la programación no lineal (NLP) aborda casos más realistas donde las relaciones son no proporcionales; la programación mixta-entera (MILP/MINLP) es indispensable para redes de tratamiento distribuidas al considerar decisiones binarias (instalar o no una unidad) junto con variables continuas; y la optimización dinámica incorpora la variación temporal de cargas contaminantes y condiciones de operación, garantizando diseños robustos frente a escenarios cambiantes (Grossmann & Guillén-Gosálbez, 2010).

En este contexto, las tecnologías de tratamiento de metales pesados han evolucionado significativamente. Los procesos tradicionales como la precipitación química o el intercambio iónico siguen siendo relevantes, pero presentan limitaciones en eficiencia y generación de residuos secundarios (Fu & Wang, 2011). En contraste, los métodos avanzados, particularmente los electroquímicos, se han posicionado como alternativas de alta eficiencia y sostenibilidad. Técnicas como la electrocoagulación, la electrorreducción de Cr(VI) a Cr(III) y la electrodiálisis permiten una remoción más efectiva, con menor consumo de reactivos químicos y potencial de regeneración de electrodos y soluciones (Sharma *et al.*, 2019; Martínez-Huitle & Brillas, 2009). Además, la combinación de tecnologías electroquímicas con adsorbentes avanzados o membranas híbridas ofrece posibilidades de optimización tanto técnica como económica (Golder *et al.*, 2007).

La síntesis de sistemas distribuidos de tratamiento de efluentes con énfasis en contaminantes tóxicos como el cromo hexavalente no solo implica un reto técnico, sino también económico y regulatorio. La combinación de herramientas de programación matemática con información normativa y de impacto ambiental constituye un enfoque integral para desarrollar soluciones sustentables. Dichos sistemas buscan minimizar el costo total de tratamiento, cumplir con los estándares ambientales más estrictos y, al mismo tiempo, reducir el riesgo asociado a la presencia de contaminantes altamente tóxicos en los cuerpos de agua.

En síntesis, el diseño óptimo de sistemas distribuidos de tratamiento de efluentes acuosos mediante herramientas de programación matemática constituye un área de investigación clave para enfrentar problemas ambientales contemporáneos. Su aplicación en el manejo de metales pesados, particularmente el cromo hexavalente, representa un avance hacia la implementación de estrategias más eficientes y sostenibles, que no solo protegen la salud de la población y el equilibrio ecológico, sino que también favorecen la competitividad de los sectores productivos mediante el cumplimiento regulatorio y la reducción de costos asociados al tratamiento de aguas residuales.

En este trabajo, se propone un caso de estudio académico en función del trabajo presentado por Rodríguez *et al.* (2008) y se desarrolló un modelo matemático de optimización dinámica (OD) usando tasas de remoción variables.

Materiales y Métodos

Planteamiento del problema

Se debe tratar un conjunto de cuatro corrientes efluentes S_i , donde $i = \{1, 2, 3, 4\}$ con sus respectivas concentraciones de cromo hexavalente $C_{i,j}$, donde $j = \{1\}$ en dos reactores electroquímicos continuos de tanque agitado UT_n donde $n = \{1, 2\}$ para la reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente usando los balances de masa en estado transitorio con reacción química de la Ecuación 1 presentados por Rodríguez *et al.* (2008) que incluyen una cinética de orden variable.

$$\frac{d}{dt} cout_n = \frac{Q_n}{V_n} (cin_n - cout_n) - \frac{Ae^{aI_n} cout_n}{1 + Be^{-bI_n} cout_n} \tag{1}$$

La concentración ($c_{j,e}$) del flujo (F_e) en el punto de descarga debe cumplir con la norma ambiental ($c_{j,e}^U$) para su descarga en el alcantarillado. En la Tabla 1 se presentan los parámetros del sistema de tratamiento y del modelo cinético, así como las cotas inferior y superior para el volumen (v_n) del reactor y de la densidad de corriente (I_n).

Tabla 1. Parámetros del modelo matemático de programación no lineal

Datos de las Corrientes efluentes			Parámetros del modelo cinético			
i	S_i (L/min)	$C_{i,j}$ (mg/L)	Modelo cinético	Cota inferior (L)	Cota superior (U)	
1	3	350	$A = 0.7483$	Densidad de corriente I_n	$I^L = 190 \text{ A/m}^2$	$I^U = 350 \text{ A/m}^2$
2	5	450	$B = 0.1772$	Volumen del reactor V_n	$V^L = 0 \text{ L}$	$V^U = 1250 \text{ L}$
3	7	500	$a = 0.001$			
4	9	570	$b = 0.003$			
$F_e = \sum_{i=1}^4 S_i = 24$		$c_{j,e}^U = 0.5$				

Superestructura y nomenclatura

Los sistemas distribuidos de tratamiento de efluentes se pueden diseñar a partir de una superestructura que engloba las diferentes posibilidades de diseño topológico, por lo que su desarrollo es de gran utilidad durante la síntesis de sistema de tratamiento. En la Figura 1 se presenta la superestructura para el tratamiento de efluentes acuosos la cual se compone de divisores (círculos negros), mezcladores (círculos sin relleno) y unidades de tratamiento (cuadros), donde la sección A corresponde a las fuentes generadoras de corrientes efluentes (S_i) que provienen de algún proceso; la sección B corresponde a las unidades de tratamiento (UT_n) (reactores electroquímicos) y son alimentadas por las fracciones de flujo que derivan de las fuentes ($f_{i,n}$), a su vez, las UT_n también pueden ser alimentadas por una estructura de recirculación a partir de la misma unidad de tratamiento ($G_{n,n}$) y a partir de otra diferente ($G_{n',n}$). Por otra parte, el flujo que pasa a través de una unidad de tratamiento es Q_n con concentraciones de entrada y salida cin_n y $cout_n$ respectivamente. Finalmente, el flujo F_e corresponde al flujo en el punto de descarga (e) con concentración $c_{j,e}$ y puede ser alimentado por las fuentes i y las

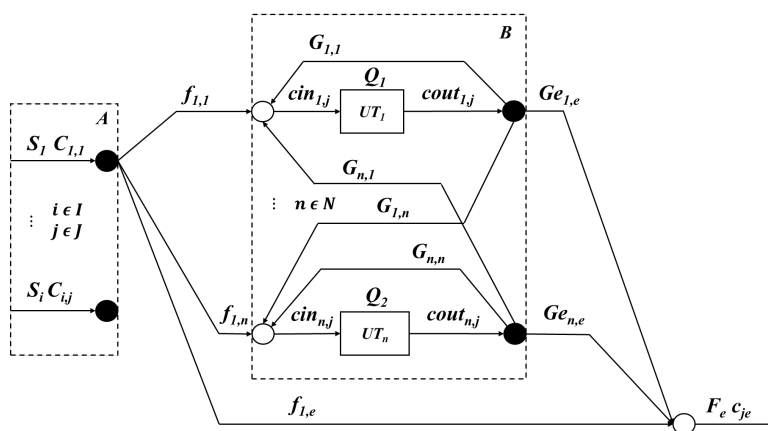


Figura 1. En esta figura se presenta la superestructura para el diseño de un sistema de tratamiento de efluentes

Finalmente, el flujo que pasa a través de una unidad de tratamiento es Q_n con concentraciones de entrada y salida cin_n y $cout_n$ respectivamente. Finalmente, el flujo F_e corresponde al flujo en el punto de descarga (e) con concentración $c_{j,e}$ y puede ser alimentado por las fuentes i y las

unidades de tratamiento n , $f_{i,e}$ y $Ge_{n,e}$ respectivamente; por lo tanto, el conjunto de las fuentes de corrientes efluentes es $\{i \in I\}$ y el conjunto de unidades de tratamiento es $\{n \in N\}$. En este trabajo, el conjunto de contaminantes $\{j \in J\}$ y el de los puntos de descarga $\{e \in E\}$ solo tienen un elemento ya que se trabaja con solo un contaminante (cromo hexavalente) y un solo punto de descarga.

Modelo de programación matemática no lineal (PNL)

El modelo de programación no lineal consiste de balances de materia realizados en cada unidad de operación, de acuerdo a la superestructura de la Figura 1. Los balances globales en los divisores (círculos negros) posteriores a las fuentes i se presentan en la ecuación 2:

$$S_i = f_{i,n} + f_{i,e} \quad i \in I \quad (2)$$

En la Ecuación 3 y Ecuación 4 se presentan los balances de materia globales y parciales en los mezcladores (círculos sin relleno) previos a las unidades de tratamiento UTn:

$$Q_n = \sum_{i=1} f_{i,n} + \sum_{n'=1} G_{n',n} \quad n \in N \quad (3)$$

$$cin_n Q_n = \sum_{i=1} C_{i,j} f_{i,n} + \sum_{n'=1} cout_{n'} G_{n',n} \quad n \in N; j \in J \quad (4)$$

En la Ecuación 5 se muestran los balances de materia globales en el divisor (círculos negros) posteriores a las unidades de tratamiento UTn:

$$Q_n = \sum_{e=1} Ge_{n,e} + \sum_{n'=1} G_{n,n'} \quad n \in N \quad (5)$$

Finalmente, en la Ecuación 6 y Ecuación 7 se presentan los balances de materia global y parcial en el mezclador (círculo sin relleno) del punto de descarga de la superestructura (ver Figura 1):

$$F_e = \sum_{i=1} f_{i,e} + \sum_{n=1} Ge_{n,e} \quad e \in E \quad (6)$$

$$c_{j,e} F_e = \sum_{i=1} C_{i,j} f_{i,e} + \sum_{n=1} cout_n Ge_{n,e} \quad e \in E; j \in J \quad (7)$$

La restricción para la descarga de cromo hexavalente en el alcantarillado se establece a continuación:

$$c_{j,e} \leq c_{j,e}^U \quad j \in J; e \in E \quad (8)$$

Las restricciones para las variables de decisión del modelo PNL se establecen a continuación:

$$f_{i,n} \leq S_i \quad i \in I \quad (9)$$

$$f_{i,e} \leq S_i \quad i \in I; e \in E \quad (10)$$

$$Q_n \leq F_e \quad i \in I \quad (11)$$

$$cin_n \leq \text{Max}\{C_{i,j}\} \quad i \in I; j \in J \quad (12)$$

$$cout_n \leq \text{Max}\{C_{i,j}\} \quad i \in I; j \in J \quad (13)$$

$$G_{n,n'} \leq F_e \quad n \in N; n' \in N \quad (14)$$

El modelo de programación dinámica (PD) se compone de la Ecuación 1 a la Ecuación 7 junto con las restricciones y las cotas de la Tabla 1, además se establece que las variables de decisión son positivas.

Para simplificar el problema abordado, se utiliza una función objetivo que minimiza el flujo en cada unidad de tratamiento, bajo la suposición de que el costo de tratamiento es proporcional al flujo.

De forma esquemática se presenta el modelo PD:

$$\text{Min } Z = Q_1 + Q_2$$

Sujeto a

Ecuación 1 a Ecuación 7

Restricciones de desigualdad de 8 a 14

Variables de decisión positivas

Resultados y Discusión

El modelo PNL se implementó en el sistema de Matlab usando la función `fmincon`, junto con el modelo de la Ecuación 1 y cuenta con 29 variables y 14 ecuaciones dando un total de 15 grados de libertad. En la Tabla 2 se muestran los resultados de las variables de decisión, se puede observar que una fracción de la corriente S_1 es tratada en la UT_1 y la otra fracción es tratada en UT_2 , para las corrientes S_2 , S_3 y S_4 son tratadas en la UT_1 cuyo flujo Q_1 es de 23.322 L/min en donde la concentración de entrada cin_1 es de 501.357 mg/L y la concentración de salida $cout_1$ es de 17.945 mg/L, se observa que esta concentración no cumple con la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece 0.5 mg/L para su descarga en los cuerpos receptores, por lo que es enviada a la segunda unidad de tratamiento UT_2 en donde el flujo Q_2 es de 24 L/min con concentración de entrada cin_2 es de 27.322 mg/L y la concentración de salida $cout_2$ es de 0.5 mg/L cumpliendo así con la norma ambiental. Cabe mencionar que, al tener una norma ambiental muy restrictiva para el cromo hexavalente, se obliga a tratar completamente cada corriente efluente.

Por otra parte, en la Tabla 2 también se presentan los resultados de las variables de volumen V_1 y V_2 y de la densidad de corriente eléctrica I_1 e I_2 los cuales están incluidos en el balance de masa en estado transitorio con reacción química de la Ecuación 1, los cuales igualan a sus cotas superiores para lograr cumplir con la norma ambiental.

En la Figura 2 se presenta el modelo dinámico de la Ecuación 1, donde se puede observar que el perfil de concentraciones alcanza su estado estacionario cercano a los 18 mg/L considerando que inicio con 501.357 mg/L (Figura 2a), por otra parte, en la segunda unidad de tratamiento el flujo entra con una concentración inicial cercana a 27 mg/L y alcanzar su estado estable en 0.5 mg/L como lo indica la norma mexicana para la descarga de cromo hexavalente (Figura 2b).

Los resultados muestran un tiempo de residencia τ_1 de 53.59 min y una tasa de remoción R_1 de 96.4 % para la UT_1 y un tiempo de residencia τ_2 de 52.08 min y una tasa de remoción R_2 de 98.1 % en la UT_2 . Los resultados presentados son comparables con las tasas de remoción presentadas en trabajos previos, en donde se presentan variaciones de 60 a 99.9 % de acuerdo a la velocidad de flujo en el reactor, con tiempos de residencia desde 15 min hasta 2 horas (Barrera *et al.* 2003; Kabdaslı *et al.*, 2023).

Finalmente, en la Figura 3 se presenta la topología de diseño de acuerdo con la superestructura de la Figura 1 en donde se presentan todas las interconexiones y sus respectivas cantidades de flujo y concentración del sistema de tratamiento.

Tabla 2. Resultados del modelo matemático de programación dinámica

Variable (unidades)	Cota inferior	Valor	Cota superior
$f_{1,1}$ (L/min)	0	2.322	3
$f_{1,2}$ (L/min)	0	0.678	3
$f_{1,e}$ (L/min)	0	0	3
$f_{2,1}$ (L/min)	0	5	5
$f_{2,2}$ (L/min)	0	0	5
$f_{2,e}$ (L/min)	0	0	5
$f_{3,1}$ (L/min)	0	7	7
$f_{3,2}$ (L/min)	0	0	7
$f_{3,e}$ (L/min)	0	0	7
$f_{4,1}$ (L/min)	0	9	9
$f_{4,2}$ (L/min)	0	0	9
$f_{4,e}$ (L/min)	0	0	9
Q_1 (L/min)	0	23.322	24
Q_2 (L/min)	0	24	24
cin_1 (mg/L)	0	501.357	570
cin_2 (mg/L)	0	27.322	570
$cout_1$ (mg/L)	0	17.945	570
$cout_2$ (mg/L)	0	0.5	570
$G_{1,1}$ (L/min)	0	0	24
$G_{1,2}$ (L/min)	0	23.322	24
$G_{2,1}$ (L/min)	0	0	24
$G_{2,2}$ (L/min)	0	0	24
$G_{1,e}$ (L/min)	0	0	24
$G_{2,e}$ (L/min)	0	24	24
$C_{j,e}$ (mg/L)	0	0.5	0.5
V_1 (L)	0	1250	1250
I_1 (A/m ²)	0	350	350
V_2 (L)	0	1250	1250
I_2 (A/m ²)	0	350	350

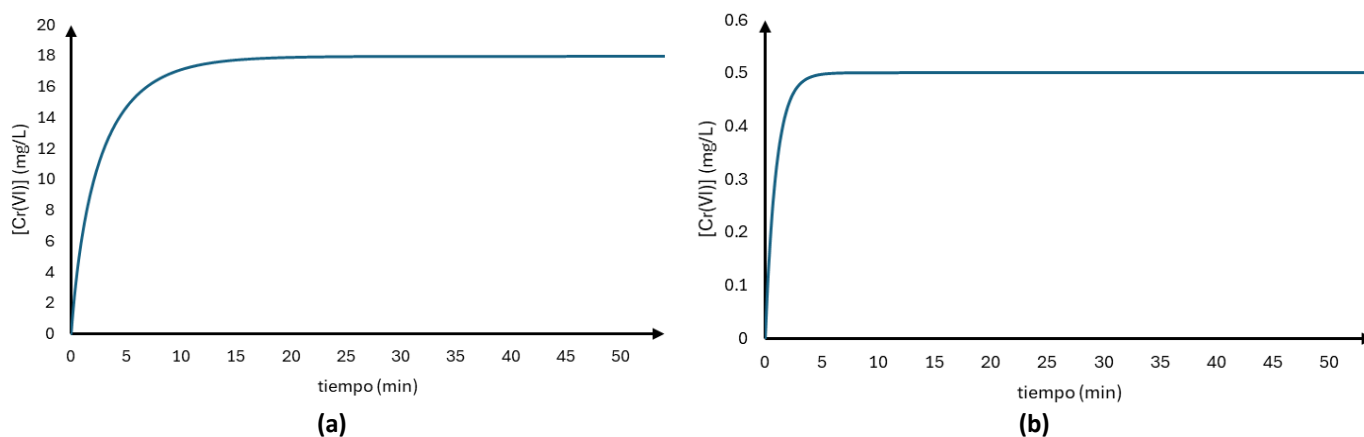


Figura 2. Cambio de la concentración de cromo hexavalente con respecto al tiempo según el modelo de la Ecuación 1: (a) Perfil de concentración en la unidad de tratamiento uno y (b) Perfil de concentración en la unidad de tratamiento dos

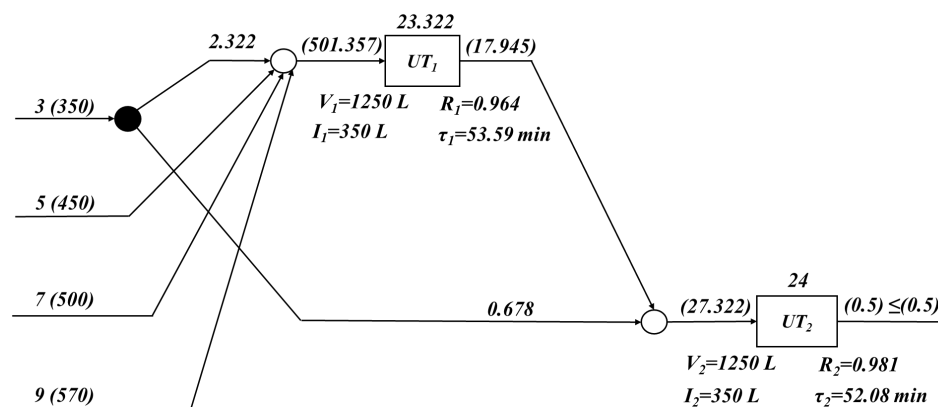


Figura 3. Topología de diseño final del sistema de tratamiento de efluentes contaminados con cromo hexavalente

Conclusiones

Los resultados de este trabajo muestran que es posible obtener un diseño óptimo mediante programación dinámica de un sistema de tratamiento de conjuntos de corrientes efluentes. El esquema de optimización permite dar cumplimiento a la norma ambiental para la descarga de cromo hexavalente a los cuerpos receptores como un alcantarillado municipal, suponiendo que el costo de tratamiento es proporcional al flujo alimentado en cada reactor electroquímico. Por otra parte, es posible implementar ecuaciones diferenciales que representan un modelo de balance de materia en estado transitorio y con reacción química, lo cual permite usar tasas de remoción variables, en contraste con los trabajos previos, donde típicamente se usan tasas de remoción constantes a partir de balances de masa en estado estacionario.

Agradecimientos y financiamiento: ALY (No. CVU: 502742) agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico mediante el estímulo del Sistema Nacional de Investigadoras e investigadores (SNII).

Bibliografía

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2012). *Toxicological profile for chromium*. U.S. Department of Health and Human Services.
- Barrera-Díaz, C., Palomar-Pardavé, M., Romero-Romo, M., & Martínez, S. (2003). Chemical and electrochemical considerations on the removal process of hexavalent chromium from aqueous media. *Journal of Applied Electrochemistry*, 33, 61–71. <https://doi.org/10.1023/A:1022983919644>
- El-Halwagi, M. M. (2017). *Sustainable design through process integration: Fundamentals and applications to industrial pollution prevention, resource conservation, and profitability enhancement*. Butterworth-Heinemann.
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- Golder, A. K., Samanta, A. N., & Ray, S. (2007). Removal of Cr(VI) from aqueous solutions using electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 653–661. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.021>
- Grossmann, I. E., & Guillén-Gosálbez, G. (2010). Scope for the application of mathematical programming techniques in the synthesis and planning of sustainable processes. *Computers & Chemical Engineering*, 34(9), 1365–1376. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.11.012>
- Kabdaslı, I., & Tünay, O. (2023). Hexavalent chromium removal from water and wastewaters by electrochemical processes: Review. *Molecules*, 28, 2411. <https://doi.org/10.3390/molecules28052411>
- Kimbrough, D. E., Cohen, Y., Winer, A. M., Creelman, L., & Mabuni, C. (1999). A critical assessment of chromium in the environment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 29(1), 1–46. <https://doi.org/10.1080/10643389991259164>
- Martínez-Huitle, C. A., & Brillas, E. (2009). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 87(3–4), 105–145. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.09.017>
- NOM-001-SEMARNAT-2021. (2022). *Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- Owlad, M., Aroua, M. K., Daud, W. A. W., & Baroutian, S. (2009). Removal of hexavalent chromium-contaminated water and wastewater: A review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 200(1–4), 59–77. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9893-7>
- Rodríguez, M. G., Mendoza, V., Puebla, H., & Martínez, S. A. (2008). Removal of Cr(VI) from wastewaters at semi-industrial electrochemical reactors with rotating ring electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2–3), 1221–1229. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.114>
- Sharma, Y. C., Srivastava, V., & Singh, V. K. (2019). Electrochemical treatment technologies for wastewater containing heavy metals: A critical review. *Environmental Technology & Innovation*, 14, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100107>
- World Health Organization (WHO). (2017). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum*. WHO.