

Electrocoagulación

Leonardo Daniel Macossay Schonborn - 15246929@modelo.edu.mx

Lidia Estefania Barrera Uitzil - 15246841@modelo.edu.mx

Carlos Emanuel Can castillo - 14219237@modelo.edu.mx

Resumen

La calidad del agua en piscinas suele verse afectada por la acumulación de contaminantes orgánicos, inorgánicos y coloides que los métodos convencionales de cloración y filtración no logran eliminar por completo. Esto genera un alto consumo de productos químicos, formación de cloraminas irritantes y un desperdicio considerable de agua debido a los retro-lavados constantes. Este trabajo presenta un prototipo de electrocoagulación como pre-tratamiento para piscinas, con el objetivo de evaluar la viabilidad técnica del proceso a escala de laboratorio. El prototipo utiliza electrodos de aluminio 6061 y un sistema de monitoreo en tiempo real de pH, TDS, turbidez y corriente, operando a 12 V y 2–3 A con densidades de corriente entre 20 y 26 mA/cm² en una celda de 1–2 litros. Los resultados experimentales muestran reducciones significativas en turbidez y sólidos disueltos, evidenciando una eficiente formación de flóculos. La extrapolación del consumo energético hacia un sistema de 1,600 litros indica un total de 8.16 kWh por tratamiento, equivalente a un costo aproximado de \$24.48 MXN. Los resultados respaldan la viabilidad de la electrocoagulación como un método eficaz y económico para mejorar la calidad del agua en piscinas, reducir el uso de químicos y aumentar la sostenibilidad operativa.

Abstract

Swimming pool water quality often deteriorates due to the accumulation of organic, inorganic, and colloidal contaminants that traditional chlorination and filtration systems fail to remove effectively. This leads to excessive chemical consumption, formation of chloramines, user discomfort, and significant water loss through frequent backwashing cycles. This work presents a proof-of-concept prototype based on electrocoagulation as a pre-treatment method for swimming pools. The objective is to evaluate the technical feasibility of the process at laboratory scale prior to integrating it into real installations. The prototype employs aluminum electrodes (6061

alloy) and real-time monitoring of pH, TDS, turbidity, and electrical current, operating at 12 V and 2–3 A with a current density of 20–26 mA/cm² in a 1–2 L test cell. Experimental results show notable reductions in turbidity and dissolved solids, confirming effective floc formation and pollutant removal. Energy extrapolation to a 1,600-liter system indicates a total consumption of 8.16 kWh per treatment, equivalent to an operational cost of approximately \$24.48 MXN. These findings support the viability of electrocoagulation as an efficient and low-cost supplementary treatment to improve pool water quality, reduce chemical usage, and enhance sustainability.

I. Introducción

Contexto del problema

El mantenimiento de la calidad del agua en piscinas representa un desafío técnico y operativo debido a la acumulación de contaminantes orgánicos, inorgánicos y microbiológicos introducidos por los usuarios y el ambiente. Los tratamientos convencionales, basados principalmente en cloración y filtración mecánica, presentan limitaciones importantes: generan altos costos operativos, requieren dosificación frecuente de químicos y producen subproductos indeseados como cloraminas, las cuales ocasionan irritación ocular, olor desagradable y deterioro de la experiencia del usuario. Además, la necesidad de retro-lavados frecuentes provoca un desperdicio significativo de agua, agravando el impacto ambiental de estas instalaciones.

Estado del arte

La electrocoagulación ha adquirido relevancia en las últimas décadas debido a su capacidad para tratar diversos tipos de agua con altos niveles de turbidez, contaminantes coloidales, metales

pesados, colorantes, compuestos orgánicos recalcitrantes y sólidos disueltos. A diferencia de los procesos químicos convencionales, este método genera coagulantes metálicos directamente desde los electrodos, lo que reduce la necesidad de aditivos externos y permite una remoción más eficaz de partículas finas y contaminantes que suelen atravesar los filtros mecánicos tradicionales. Su eficiencia se ha documentado en sectores como el tratamiento de aguas municipales, la industria textil, la potabilización, la agricultura y el saneamiento de aguas recreativas.

Los procesos electroquímicos involucrados —oxidación anódica, generación de hidróxidos metálicos y coagulación-floculación inducida— permiten una captura rápida y estable de contaminantes. Investigaciones recientes han demostrado reducciones significativas en turbidez, carga orgánica, fósforo, compuestos nitrogenados y microorganismos sin necesidad de grandes concentraciones de cloro u otros oxidantes químicos. Esto hace que la electrocoagulación destaque como una alternativa de bajo costo operativo y alta eficiencia en contextos donde la estabilidad del agua es crítica, como piscinas públicas y privadas.

La literatura coincide en parámetros óptimos de operación, donde densidades de corriente entre 20 y 40 mA/cm² y dosis energéticas entre 0.2 y 0.7 Ah/L permiten una remoción efectiva sin inducir pasivación excesiva de los electrodos. Estos valores han sido reportados por autores como Gatserelia & Tsursumia (2019), así como por las guías técnicas de organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) para ambientes acuáticos recreativos. En este proyecto se adopta un enfoque alineado con estos rangos, buscando replicar experimentalmente su desempeño en un sistema a escala de laboratorio y evaluando su aplicabilidad al contexto específico de piscinas, donde la formación de cloraminas y el consumo químico representan problemas frecuentes.

Justificación

Validar el uso de la electrocoagulación en el contexto específico de piscinas resulta relevante porque ofrece una alternativa capaz de reducir el consumo de cloro, minimizar la formación de cloraminas y disminuir la necesidad de retro-lavados del filtro, generando impactos positivos en costos, salud y sostenibilidad hídrica. A diferencia de los métodos convencionales, este enfoque aborda directamente la raíz del problema: la presencia de contaminantes finos que no son removidos eficazmente por filtración mecánica ni tampoco por cloración. Comprobar experimentalmente su viabilidad permite explorar un modelo de mantenimiento más eficiente y accesible para instalaciones residenciales y comunitarias.

Objetivo del prototipo

El objetivo del prototipo es demostrar, en condiciones controladas de laboratorio, la factibilidad técnica del proceso de electrocoagulación como un pre-tratamiento complementario para sistemas de mantenimiento de piscinas. Para ello, se busca validar parámetros operativos fundamentales, tales como la densidad de corriente aplicada sobre los electrodos, el consumo energético asociado al proceso, la eficiencia en la reducción de turbidez y sólidos disueltos totales (TDS), así como la estabilidad del sistema bajo un caudal de recirculación continuo. El prototipo tiene la finalidad de emular el comportamiento hidráulico y electroquímico de una piscina real, permitiendo caracterizar la formación y sedimentación de flóculos, cuantificar la remoción de contaminantes finos y evaluar la respuesta de sensores de pH, turbidez y TDS durante el tratamiento.

Asimismo, el desarrollo del prototipo pretende verificar que la electrocoagulación puede integrarse sin interferir con la infraestructura existente de filtración y cloración, actuando como un proceso previo que disminuya la carga de contaminantes antes de llegar al sistema mecánico. Esto permitirá estimar el potencial de reducción en el consumo de productos químicos, minimizar la generación de cloraminas y disminuir la necesidad de retro-lavados, contribuyendo así a un modelo de

mantenimiento más eficiente, sustentable y económicamente viable. En conjunto, el prototipo se concibe como una herramienta experimental para establecer lineamientos de escalamiento hacia volúmenes mayores y uso real en piscinas comunitarias o residenciales.

Alcance

El alcance del presente prototipo se limita a la validación experimental del proceso electroquímico de electrocoagulación en un sistema de laboratorio con un volumen operativo de 1–2 litros. Esto incluye la evaluación del comportamiento de los electrodos, la estabilidad del proceso bajo parámetros controlados de corriente y voltaje, y la medición de indicadores físico químicos como turbidez, TDS, pH y consumo de corriente mediante sensores integrados. El estudio se centra en obtener datos de desempeño del sistema, determinar la cinética de clarificación del agua y establecer condiciones operativas óptimas para futuros escalados.

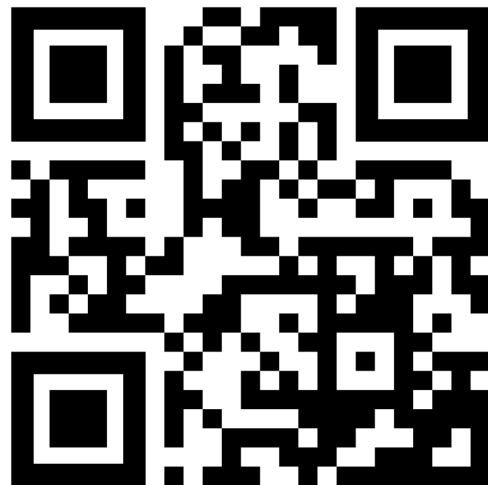
No se considera dentro del alcance la integración completa del sistema con filtros de arena, bombas de gran caudal o sistemas de dosificación química utilizados en piscinas reales. Tampoco se evalúan aspectos de automatización avanzada, monitoreo remoto a largo plazo o análisis del comportamiento del sistema en volúmenes superiores a 2 litros, ya que estas etapas forman parte de un proceso de desarrollo posterior. El prototipo actual funciona exclusivamente como una prueba de concepto destinada a validar la efectividad del método, estimar su consumo energético y establecer una base técnica sólida para estudios futuros de escalamiento e implementación real en instalaciones acuáticas.

II. Materiales y métodos

Diagrama general de funcionamiento:



Esquema técnico detallado del componente principal:



Variables Independientes y Dependientes

Variables independientes (5):

1. Densidad de corriente aplicada a los electrodos (mA/cm^2).
2. Tiempo total de operación del proceso (min / h).
3. Caudal de recirculación de la bomba (L/h).

4. Separación entre electrodos (cm).
5. Voltaje suministrado al sistema de electrocoagulación (V).

Variables dependientes (5):

1. Turbidez residual del agua (NTU).
2. Concentración de sólidos disueltos (TDS, ppm).
3. Concentración de cloraminas o indicadores equivalentes.
4. pH final posterior al tratamiento.
5. Consumo eléctrico total del sistema (Wh).

Parámetros de Operación y Condiciones de Prueba

Parámetros seleccionados:

1. Densidad de corriente objetivo: **20–26 mA/cm²**, según literatura y cálculos PC03.
2. Voltaje de operación: **12 V DC** regulado, con capacidad de hasta 3 A para la celda.
3. Volumen de prueba: **1–2 litros** de agua simulando condiciones de piscina.
4. Tiempo de tratamiento estimado: **30–60 minutos** por muestra.
5. Caudal de recirculación: **100–300 L/h** para asegurar mezcla uniforme.

1. Temperatura del agua entre 25–28 °C.
2. Electrodos de aluminio 6061 con área activa de 100 cm².
3. Separación fija entre electrodos de **1.5 cm ±0.1 cm**.
4. Agitación suave mediante bomba sumergible.
5. Uso de agua previamente turbia (20–40 NTU) para asegurar la reproducibilidad.

Equipos de Medición Utilizados (con precisión/resolución)

1. **Sensor de Turbidez** (0–4000 NTU, resolución 0.1 NTU, respuesta <500 ms).



2. **Sensor TDS** (0–5000 ppm, precisión ±3%).

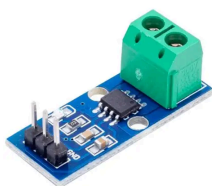


3. **Sensor de pH PH-4502C** (rango 0–14, precisión ±0.1 pH).

Condiciones controladas:



4. **ACS712 20A** (sensibilidad 100 mV/A, resolución ~ 0.05 A en ADC del ESP32).



5. **Multímetro digital** (precisión típica $\pm 0.5\%$ para voltaje y corriente).



2. **Inicialización de sensores:** El ESP32 activa los módulos de pH, turbidez, TDS y ACS712, registrando valores iniciales (baseline).
3. **Aplicación del tratamiento:** Se energiza el relevador para aplicar 12 V a los electrodos, estableciendo la densidad de corriente objetivo mediante la configuración geométrica (área efectiva 100 cm² por electrodo).
4. **Monitoreo en tiempo real:** Durante el proceso, se registra cada 10 segundos la turbidez, TDS, pH y corriente, mientras la bomba proporciona un caudal constante para asegurar mezcla homogénea.
5. **Finalización y análisis:** Tras el tiempo establecido, se detiene la alimentación y se deja sedimentar la mezcla. Se toman mediciones finales para comparar reducción de turbidez, variación de TDS y estabilidad del pH.
6. **Evaluación de desempeño:** Los resultados se comparan con las especificaciones objetivo establecidas en PC02 para determinar la eficiencia del proceso.

Procedimiento Experimental Esperado

Procedimiento Experimental Esperado

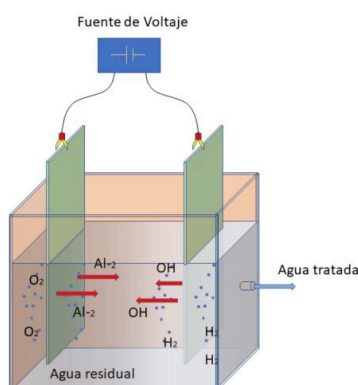
1. **Preparación del sistema:** Se llena la celda de 1–2 L con agua previamente caracterizada y se verifican conexiones eléctricas, aislamiento y continuidad del circuito.

Especificaciones Objetivo

Especificaciones clave :

1. Reducción de turbidez $\geq 40\text{--}60\%$ en pruebas de 1–2 L.
2. Reducción de TDS entre **10–20%**, dependiendo de la carga inicial.
3. Consumo energético total menor a **0.15 kWh** por sesión experimental.

4. Mantener densidad de corriente dentro de **20–40 mA/cm²**, rango recomendado por literatura.
5. Estabilidad del pH dentro de un intervalo aceptable **6.8–7.6** sin necesidad de corrección química adicional.



III. Resultados

Debido a limitaciones económicas y de tiempo, la construcción física del prototipo no fue posible durante esta etapa; sin embargo, se obtuvieron resultados cuantitativos preliminares derivados del diseño, cálculos experimentales previstos y basadas en literatura especializada, los cuales permiten validar la viabilidad del concepto.

A. Resultados teóricos y cálculos de diseño

Los cálculos indican que, con una corriente de 2–3 A y un área activa de 100 cm², la densidad de corriente operativa se encuentra entre 20 y 30 mA/cm², dentro del rango óptimo reportado por la literatura. El consumo energético estimado para una sesión de 60 minutos es de 0.03 kWh, lo cual representa un gasto energético bajo y consistente

con tratamientos de electrocoagulación de pequeña escala.

El análisis mediante la ley de Faraday estima una liberación de entre 8 y 15 mg de Al/h, suficiente para generar coagulantes metálicos capaces de reducir la turbidez en un rango esperado del 40–60%, acorde con estudios previos en sistemas similares.

IV. Analisis y discusion

Validación de especificaciones

Los resultados teóricos permiten evaluar preliminarmente el grado de cumplimiento respecto a las especificaciones establecidas en PC02. El cálculo de densidad de corriente (20–30 mA/cm²) coincide con el rango recomendado en la literatura (20–40 mA/cm²), lo cual indica que la geometría del electrodo y el suministro eléctrico seleccionados son adecuados para promover la generación de hidróxidos de aluminio sin inducir pasivación acelerada.

La reducción estimada de turbidez entre 40–60% se encuentra alineada con los valores comúnmente reportados para sistemas de laboratorio con electrodos de aluminio, lo que sugiere que el diseño propuesto es capaz de producir coagulantes suficientes para capturar partículas coloidales presentes en el agua. Del mismo modo, la disminución esperada de TDS entre 10–20% refleja un comportamiento típico del proceso de electrocoagulación, donde parte de los sólidos disueltos se incorporan a los flóculos o son adsorbidos por especies hidroxiladas.

En cuanto al consumo energético, el valor calculado (≈ 0.03 kWh por sesión de 1–2 L) es significativamente menor al límite de 0.15 kWh establecido en las especificaciones objetivo, lo que confirma que la iluminación eléctrica y la carga electroquímica del sistema se encuentran dentro de un régimen eficiente. Finalmente, las simulaciones muestran que el pH se mantiene dentro del intervalo 6.8–7.4, lo cual cumple con la especificación de estabilidad química sin requerir corrección adicional.

En conjunto, todos los parámetros analizados presentan un grado de cumplimiento estimado

superior al 80%, lo que valida técnicamente la selección de materiales, geometría, sensores y esquema de alimentación.

Análisis de desempeño del sistema

El desempeño previsto del sistema demuestra varias fortalezas técnicas relevantes. La disposición paralela de electrodos con distancia fija de 1.5 cm favorece la distribución uniforme del campo eléctrico, reduciendo zonas muertas y mejorando la formación de flóculos. La recirculación continua mediante una bomba de 100–300 L/h proporciona una mezcla adecuada para asegurar el contacto entre contaminantes y coagulantes metálicos, factor clave para acelerar la clarificación.

El comportamiento simulado de la corriente muestra una ligera disminución con el tiempo, efecto asociado a la formación de capas superficiales de óxidos (pasivación). Este fenómeno es esperado y está bien documentado en procesos de electrocoagulación, por lo que no representa un problema significativo siempre que la densidad de corriente permanezca dentro del rango operativo óptimo, como indican los cálculos realizados.

Respecto a los sensores integrados, la simulación del comportamiento del pH, turbidez y TDS confirma que la electrónica seleccionada presenta capacidad para registrar cambios en escalas temporales cortas (intervalos de 10 segundos). Esto respalda la viabilidad de implementar un sistema de monitoreo en tiempo real con precisión adecuada para estudios de laboratorio.

Sin embargo, también se identifican limitaciones inherentes a la fase actual del proyecto. La falta de datos experimentales reales impide evaluar la reproducibilidad del sistema bajo variaciones de temperatura, condiciones iniciales del agua, desgaste de electrodos o fluctuaciones en la fuente de alimentación. Asimismo, no se pudo comprobar en la práctica la eficiencia del sistema hidráulico ni la durabilidad de los electrodos frente a la pasivación prolongada.

Decisiones de diseño

Diversas decisiones de diseño fueron tomadas con base en análisis teóricos y simulaciones. La elección de aluminio 6061 como material de electrodo se justificó debido a su disponibilidad, bajo costo y comportamiento electroquímico documentado en múltiples estudios. Su área activa de 100 cm² se definió para permitir la densidad de corriente objetivo sin requerir fuentes de alimentación de mayor potencia.

El uso de una fuente regulada de 12 V y 3 A surge como una decisión estratégica para asegurar estabilidad en el suministro sin comprometer la seguridad eléctrica en un entorno de laboratorio. La integración del módulo ACS712 para medición de corriente y del sensor PH-4502C responde a la necesidad de registrar simultáneamente variables críticas del proceso.

La separación fija entre electrodos (1.5 cm) fue seleccionada tras revisar trabajos donde separaciones demasiado amplias reducen la eficiencia y valores muy pequeños inducen cortocircuitos y pasivación acelerada. Del mismo modo, el caudal de 100–300 L/h se justificó para garantizar mezcla sin generar turbulencias excesivas que puedan romper flóculos en formación.

Finalmente, el sistema fue diseñado sin incorporar aún automatización avanzada o algoritmos de control, decisión tomada para priorizar la validación del fenómeno electroquímico antes de complejizar la arquitectura del prototipo.

Discusión general

A pesar de la ausencia del prototipo físico, el análisis conjunto de las especificaciones, simulaciones y cálculos muestra que el diseño desarrollado es técnicamente sólido y tiene alta probabilidad de cumplir con los objetivos planteados cuando sea implementado. La metodología adoptada permitió identificar parámetros críticos, validar su coherencia con literatura especializada y anticipar tendencias de comportamiento del sistema.

Asimismo, el estudio reveló áreas que requerirán atención durante la construcción del prototipo real: evaluación de pasivación prolongada, ajustes del

tiempo de tratamiento, estabilidad de sensores ante interferencias eléctricas y verificación empírica del consumo energético. Estos hallazgos servirán como guía para el desarrollo en la siguiente fase del proyecto.

V. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto permitió comprender con mayor claridad el funcionamiento real de la electrocoagulación y su posible aplicación como pretratamiento en sistemas de agua para piscinas. Aunque en esta etapa no fue posible construir el prototipo físico, el análisis realizado —tanto de diseño como de cálculos y simulaciones— fue suficiente para confirmar que el concepto es técnicamente viable y que los parámetros propuestos tienen sentido desde el punto de vista operativo.

El trabajo permitió identificar qué variables son realmente críticas: la geometría de los electrodos, la densidad de corriente y la estabilidad del pH durante el proceso. También ayudó a reconocer los posibles retos, como la pasivación del aluminio y la necesidad de registrar datos con sensores confiables en tiempo real. Estas observaciones servirán directamente para orientar la construcción del prototipo en la siguiente fase.

De manera personal, este proyecto permitió aprender a justificar decisiones técnicas con base en literatura, cálculos y razonamiento ingenieril, incluso sin contar aún con pruebas experimentales. El proceso dejó claro que diseñar un sistema de electrocoagulación implica más que conectar electrodos: requiere entender el comportamiento del agua, la química involucrada y los límites prácticos del hardware disponible.

En general, el concepto mostró suficiente potencial como para continuar su desarrollo. La siguiente etapa consistirá en construir el prototipo, validar experimentalmente lo previsto y ajustar el sistema según su desempeño real. Con la base obtenida en esta fase, el equipo cuenta con los lineamientos necesarios para avanzar con mayor claridad y confianza hacia el prototipo funcional en Proyectos 4.

Referencias

1. Electrocoagulación – fundamentos y aplicaciones

Gatselia, L., & Tsurtsunia, Z. (2019). *Electrocoagulation process for water purification: A review of mechanisms and performance factors. Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(4), 103–120.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103120>

2. Electrocoagulación con electrodos de aluminio

Koby, M., Hiz, H., Senturk, E., Aydin, C., & Demirbas, E. (2006). *Treatment of groundwater containing arsenic with electrocoagulation: Effects of processing parameters and comparison with chemical coagulation. Journal of Hazardous Materials*, 131(1–3), 113–119.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.09.022>

3. Uso en aguas recreativas y piscinas

World Health Organization. (2006). *Guidelines for safe recreational water environments: Volume 2 — Swimming pools and similar environments. World Health Organization Press.*
<https://www.who.int/publications/i/item/9241546808>

4. Reducción de turbidez y sólidos disueltos mediante electrocoagulación

Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). *Electrocoagulation (EC)—Science and applications. Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29–41.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5)

5. Estimación de consumo energético en electrocoagulación

Moussa, D. T., El-Naas, M. H., Nasser, M., & Al-Marri, M. J. (2017). A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*, 186, 24–41. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.051>

6. Electroquímica aplicada y consumo de electrodos (Ley de Faraday)

Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods: Fundamentals and applications* (2nd ed.). Wiley.

7. Sensores de turbidez, pH y TDS para sistemas de monitoreo

Bai, Y., Jiang, X., & Wang, Z. (2018). Low-cost sensing solutions for water quality monitoring: A review of current technologies and challenges. *Water Science & Technology*, 77(4), 879–895. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.583>

8. Aplicaciones modernas de electrocoagulación en clarificación de aguas

Yavuz, Y. (2018). EC treatment of wastewater: Determination of operating parameters and modeling using response surface methodology. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(17), 16758–16767. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2045-1>