

Clarificación de agua con generación de energía eléctrica en una celda galvánica Al-H₂O₂

Water Clarification with Electrical Energy Generation by Al-H₂O₂ Galvanic Cell

Freddy Leonard Alfonso Moreno¹, Diego Enrique Gómez Cervantes²

¹<https://orcid.org/0000-0002-2471-8063> Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, flalfonsom@udistrital.edu.co

²<https://orcid.org/0000-0001-6867-9927> Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, degomezc@correo.udistrital.edu.co

Fecha de recepción: 28/03/2019 Fecha de aceptación del artículo: 26/08/2019



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: doi.org/10.18041/1794-4953/avances.15106

Como citar: Alfonso Moreno, F., & Gómez Cervantes, D. (2019). Clarificación de agua con generación de energía eléctrica en una celda galvánica Al-H₂O₂. *Avances: Investigación En Ingeniería*, 16(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.15106>

Resumen

La generación de energía eléctrica por oxidación de aluminio produce el catión Al³⁺ y especies como Al(OH)₃, responsables de inducir la floculación en tratamientos de agua. Este artículo busca evidenciar que una celda galvánica Al-H₂O₂ puede desestabilizar los sólidos suspendidos del agua empleada como electrolito de la celda, para describir un proceso de clarificación que genera energía eléctrica en lugar de consumirla. Así, se elaboró una celda galvánica con ánodo de aluminio, cátodo de grafito, H₂O₂ como oxidante y una suspensión de arcilla en solución KCl como electrolito que simuló el agua objeto de tratamiento; se evaluó la eliminación de turbidez en la suspensión, la diferencia de potencial y la corriente eléctrica generada. El sistema propuesto clarificó agua por floculación y disolución, a la vez que generó en promedio 0,613 V y 8,51 C entregados a una intensidad media de 157 µA. La hidrólisis de aluminio eliminó por floculación el 88,9 ± 1% de turbiedad y mejoró al 96,6 ± 1% al añadir H₂O₂, el cual solubilizó partículas suspendidas, estimuló la liberación de corriente eléctrica y mitigó la caída de voltaje. De esta manera, se presenta un sistema de obtención de energía eléctrica a partir de un tratamiento primario de agua, inducido por subproductos de una transformación directa de energía química a eléctrica.

Palabras clave: clarificación de agua, energía eléctrica, electroquímica, aluminio, H₂O₂.

Abstract

Electrical energy generation by aluminum oxidation produces Al³⁺ cation and species like Al(OH)₃, responsible for inducing flocculation in water treatment. This paper aims to highlight the fact that an Al-H₂O₂ galvanic cell can destabilize the suspended solids of a water used as cell's electrolyte, in order to describe a clarification process with electrical energy generation instead of consumption. Thus, a galvanic cell was made by using an aluminum anode, a graphite cathode, H₂O₂ as oxidant and a clay suspension in KCl solution as electrolyte that simulated the water to treat; removal of turbidity of suspension, potential difference and the generated electrical current were evaluated. The proposed system clarified water by flocculation and dissolution, as well as generated an average of 0.613 V and supplied 8.51 C at an average intensity of 157 µA. Aluminum hydrolysis eliminated 88.9±1% of turbidity by flocculation, improving to 96.6±1% by addition of H₂O₂, that solubilized suspended particles, stimulated electrical current generation and mitigated the voltage fall. This way, it is presented a system of obtaining energy from a primary water treatment induced by sub-products of chemical-electrical direct energy transformation.

Keywords: water clarification, electrical energy, electrochemistry, aluminum, H₂O₂.

Introducción

El escaso o nulo acceso a la energía eléctrica ocasiona tratamientos de agua deficientes [1] que incrementan el riesgo de sufrir enfermedades asociadas a la ingesta de agua no apta para el consumo humano [2], las cuales han llegado a representar el 10% de las enfermedades mundiales [3]. Los países en vías de desarrollo son los más vulnerables a padecer estos efectos [4], [5], y en adición, son a los que más les cuesta obtener energía de sus aguas, ya que la tecnología existente para ello es compleja y costosa [6], [7], por ejemplo, en Estados Unidos, el país con más plantas de tratamiento con autosuficiencia energética (según reporte de Gu et al. [6] en 2017), menos del 10% de éstas presentan excedentes comercializables [6].

Los procesos de tratamiento de agua a partir de los cuales se obtiene energía suelen ser los tratamientos secundarios, sin embargo, la mayoría de estos procesos se encuentran en fase de prueba [6], como es el caso de las celdas de combustible que transforman energía química en eléctrica al oxidar y reducir contaminantes [8], mientras que los tratamientos biológicos que producen biocombustibles, sí se encuentran en fase aplicable [6], [9]. Por su parte, los tratamientos fisicoquímicos primarios no se han contemplado para obtener energía [6], [7], [9] e incluso se ha llegado a consumirla, como sucede en la electrocoagulación [10].

Teniendo en cuenta que la suma de energía obtenida en distintas etapas del tratamiento de agua podría alcanzar tratamientos sostenibles [6], [7], se hace necesario desarrollar tecnologías que permitan obtener energía mediante tratamientos de agua distintos a los secundarios, y que asimismo puedan complementarlos. En este sentido, llaman la atención el aluminio y el peróxido de hidrógeno (H₂O₂), ya que el aluminio, el metal más abundante en la corteza terrestre, considerado un recurso energético de bajo costo [11]-[13], se usa ampliamente en tratamientos primarios de agua [2], [14], [15], y el H₂O₂, un oxidante empleado en pretratamientos de agua [16], es útil además para generar potencia eléctrica en entornos anóxicos [17]. Además, al usar el aluminio como ánodo y el H₂O₂ como oxidante, se han configurado baterías y celdas de combustible para sistemas eléctricos autónomos [18]-[20].

Las celdas basadas en oxidación de aluminio y reducción de H₂O₂ (Al-H₂O₂) pueden ser de único o doble compartimiento. Al separar el H₂O₂ del aluminio (doble compartimiento), se busca evitar las reacciones entre oxidante y ánodo, que no generan corriente eléctrica y sí afectan la potencia desarrollada; mientras que las celdas de único compartimiento, aunque presenten más reacciones de este tipo, son menos costosas y más sencillas en su diseño y operación [13], [17], [20].

Basados en que el H₂O₂ mejora procesos de separación de sólidos [21], [22] y en que al generar energía eléctrica con aluminio se forma Al(OH)₃ [11], [12], especie cuya aptitud adsorbente desestabiliza suspensiones [14], [15], en este artículo se busca evidenciar que una celda galvánica Al-H₂O₂ de único compartimiento que use agua con sólidos suspendidos y disueltos como electrolito, puede inducir una floculación que describa un proceso de clarificación de agua con simultánea generación de energía eléctrica. Dado que las arcillas son una de las principales causas naturales de la turbiedad del agua [23], se empleó una suspensión de arcilla natural comercial en solución KCl como electrolito que simula un agua a la cual se le desean remover los coloides, ya que pueden transportar contaminantes como virus, metales pesados, pesticidas, entre otros [23], [24], y al obstruir el paso de luz a través del agua, limitan la productividad primaria

en ecosistemas acuáticos [25]. Se explica también el origen de la desestabilización coloidal y el efecto de clarificación en relación con el comportamiento eléctrico del sistema.

1. Metodología

1.1. Elaboración de unidades de observación

Se agregó progresivamente arcilla roja natural comercial Clay Dynamic a 1 L de agua destilada hasta obtener una suspensión coloidal de 350 unidades nefelométricas de turbidez (NTU, por su sigla en inglés), que simuló los sólidos suspendidos del agua objeto de tratamiento. Seguidamente, se elaboró una solución de KCl de 0,007 M en la suspensión (equivalente a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, según la curva de calibración de patrones estándar del método electrométrico para determinar conductividad eléctrica en aguas, guía TP0082 del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia), a fin de simular los sólidos disueltos de un agua en el límite permisible de conductividad eléctrica (CE), según la legislación colombiana vigente (Resolución 2115 de 2007). Con un conductivímetro Orion Star A112 se verificó la CE de la suspensión.

Con 20 mL de la suspensión coloidal (agua problema) y 0,5 mL de H_2O_2 al 1%, se siguió el esquema electroquímico propuesto (figura 1), elaborando cinco réplicas de cada una de las siguientes unidades de observación (UO):

Celda sin H_2O_2 (C-0).

Celda con H_2O_2 (C-1).

Suspensión sin H_2O_2 con lámina de aluminio sumergida (Al-0).

Suspensión con H_2O_2 y lámina de aluminio sumergida (Al-1).

Suspensión con H_2O_2 (S- H_2O_2).

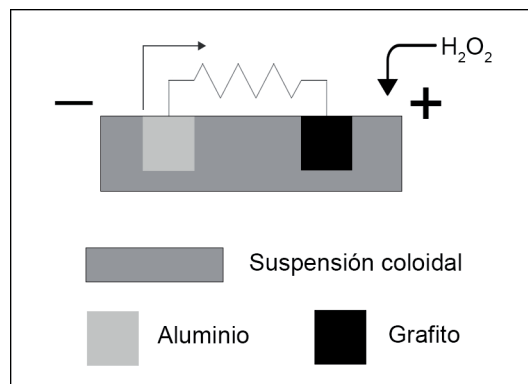


Figura 1. Esquema de celda galvánica Al- H_2O_2 propuesta. Fuente: elaboración propia.

El esquema propuesto (figura 1) usó un cátodo rectangular de grafito con 20 mm^2 de área sumergida (área activa), separado 30 mm de una lámina rectangular de aluminio (ánodo) con 20 mm^2 de área activa. Los electrodos se unieron con una resistencia de descarga de 1 M Ω . El área superficial de la lámina sumergida en Al-0 y Al-1 fue equivalente al área activa del ánodo en C-0 y C-1 (20 mm^2).

1.2. Toma y análisis de datos

C-1 es la celda propuesta; C-0 se usó como testigo para analizar la influencia del H₂O₂ en la generación energética. Al-0 muestra el comportamiento de la suspensión debido a la hidrólisis del aluminio; S-H₂O₂ muestra lo sucedido en la suspensión al aplicar H₂O₂; Al-1 muestra el comportamiento de la suspensión por hidrólisis del aluminio en presencia de H₂O₂.

Al añadir H₂O₂ a las UO correspondientes, con un multímetro digital PeakTech 1070DMM se registró la diferencia de potencial E(mV) y la intensidad de corriente eléctrica I(μA) en C-0 y C-1 cada 5 h, describiendo el estado de la suspensión en términos de formación de flóculos en las UO, hasta percibir sedimentación de flóculos. En cada registro se realizó una agitación manual en las UO con un agitador de vidrio.

Tras la sedimentación de flóculos, se midió la turbidez con un turbidímetro Hanna HI 88713 y el pH con pH-metro Hach HQ411D, con el fin de establecer las reacciones químicas y electroquímicas del proceso.

Los datos se procesaron en el software R 3.5.3. Inicialmente, se analizaron las observaciones del estado de la suspensión y la turbidez media alcanzada en las UO. Posteriormente, se realizó un análisis de varianzas (Anova) para evaluar la hipótesis de que hay diferencias significativas en el porcentaje de eliminación de turbidez logrado en las UO que floccularon (H1), enfrentándolas de la siguiente manera: C-0 vs. Al-0 y C-1 vs. Al-1 para conocer la influencia de la celda en la eliminación de turbidez, y C-0 vs. C-1 y Al-0 vs. Al-1 para de conocer la influencia del H₂O₂.

Respecto a la generación energética, mediante regresiones polinómicas, con los registros de E(mV) e I(μA) se establecieron las ecuaciones de diferencia de potencial e intensidad de corriente eléctrica generada por las celdas en función del tiempo (E(t); I(t)), con las cuales se calculó el voltaje medio desarrollado (\bar{E}) la cantidad de electricidad obtenida (Q) y la intensidad media de corriente eléctrica generada (\bar{I}). Con esta información, y las gráficas de las curvas de las funciones E(t) e I(e), se analizó la dinámica de los parámetros eléctricos en relación con la clarificación del agua.

2. Resultados y discusión

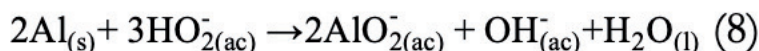
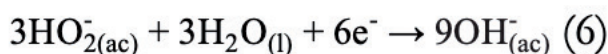
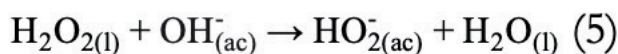
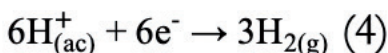
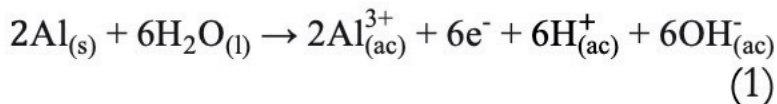
La CE de la suspensión coloidal fue $994 \pm 6,71 \mu\text{S}/\text{cm}$. Además de simular las condiciones estipuladas en la metodología (1.1), los sólidos disueltos brindan un medio electrolítico que garantiza la funcionalidad de la celda, y como este es un aspecto que varía entre cuerpos hídricos, el desempeño de la celda propuesta depende de la CE del agua que será clarificada y empleada como electrolito. Se espera una mejor clarificación y generación de energía en aguas con alta CE, ya que la adición de electrolitos estimula la generación de energía eléctrica por vía electroquímica [11], [13], [26] y contrae la doble capa eléctrica de los coloides, lo cual facilita su desestabilización [14], [15].

2.1. Dinámica química y electroquímica del proceso

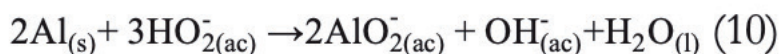
Al ser de único compartimiento, la celda propuesta presenta reacciones químicas, además de las electroquímicas de generación energética.

Basados en Li y Bjerrum [13], An et al. [17], Brodrecht y Rusek [20], Raptis et al. [27], Silberman et al. [28], y según el pH registrado en las UO ($7,35 < \text{pH} < 7,42$), las reacciones electroquímicas que

tendrían lugar en la celda propuesta serían: por un lado, la oxidación de aluminio que aporta la carga eléctrica y el catión Al^{3+} (Ec. 1) que puede formar el anión AlO_2^- (Ec. 2) o precipitar en especies como $\text{Al}(\text{OH})_3$ (Ec. 3), y por otro lado, la reducción de protones a H_2 (Ec. 4) y de H_2O_2 , que al formar iones perhidroxilo (Ec. 5) se reduce a OH^- (Ec. 6). Así, las reacciones globales de generación energética son las indicadas en las ecuaciones 7 y 8.



Entre las reacciones químicas de interés, encontramos la formación de $\text{Al}(\text{OH})_3$ por hidrólisis de aluminio (Ec. 9) [11], [18], [29] y su corrosión directa con H_2O_2 (Ec. 10), que aunque pareciesen la mismas reacciones globales de generación energética (ecuaciones 7 y 8), son diferentes ya que no aprovechan el flujo electrónico [20]. Ambas reacciones químicas derivan en la pasivación del ánodo con óxidos hidratados y mezclas de óxidos [11], [29], [30].



El pH determina las especies de aluminio que se forman en el agua, y considerando que la celda ha de aplicarse en tratamientos de agua, se debe tener especial cuidado con este aspecto, ya que en medios ácidos el aluminio prevalece en forma catiónica, siendo soluble y altamente reactivo, por consiguiente tóxico para los ecosistemas y el ser humano [31]-[33]. Para nuestros propósitos, el medio ideal de trabajo se ubica en $6,8 < \text{pH} < 8$, ya que allí disminuye la toxicidad del aluminio y prevalecen especies insolubles como los complejos de hidróxidos de aluminio

que forman flóculos amorfos sedimentables [15], [31], los cuales se forman también al inducir la floculación con coagulantes como sales de aluminio [14], [15].

Además del pH, la solubilidad y la toxicidad del aluminio están influenciadas por la concentración de otras sustancias solubles, aniones inorgánicos y demás factores [31] que se omiten en las condiciones de laboratorio para eliminar variables de confusión. No obstante, en un ámbito aplicativo, se debe controlar la presencia de aluminio en el agua según límites permisibles y recomendados por las autoridades ambientales competentes [2].

2.2. Clarificación del agua

La turbidez media de la suspensión fue de $351 \pm 2,57$ NTU, y previa adición de la arcilla era de $0,49 \pm 0,27$ NTU. Tras 10 h de iniciado el experimento, C-1 y Al-1 presentaban flóculos flotantes y sedimentados, en C-0 y Al-0 se empezaban a formar los flóculos pero eran difícilmente apreciables, y en S-H₂O₂ no se percibían cambios. Después de 5 h, las celdas y suspensiones con lámina de aluminio habían floculado y sedimentado; mientras que en S-H₂O₂ la suspensión se mantenía estable.

Sin aluminio no se desestabilizó la suspensión; la sedimentación de flóculos en Al-0 indica que la reacción de aluminio metálico en agua es la responsable de inducir la floculación, mediante la cual se redujo la turbidez a menos de 50 NTU (figura 2), lo que equivale a una eliminación de turbiedad superior al 85% (figura 3). En S-H₂O₂ también disminuyó la turbidez, pero la ausencia de flóculos indica que el oxidante por sí mismo no desestabiliza la suspensión, sino que solubiliza algunas partículas; al aplicar H₂O₂, la oxidación de material adherido a la arcilla produce especies solubles y alteraciones estructurales en los minerales de ésta [34], [35], eliminando por disolución, turbiedad adicional a la eliminada por floculación en Al-1 y C-1.

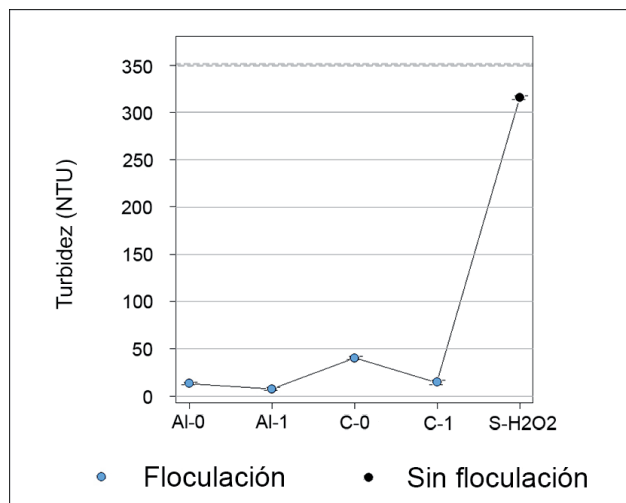


Figura 2. Turbidez media en UO tras 15 horas de observación. Fuente: elaboración propia

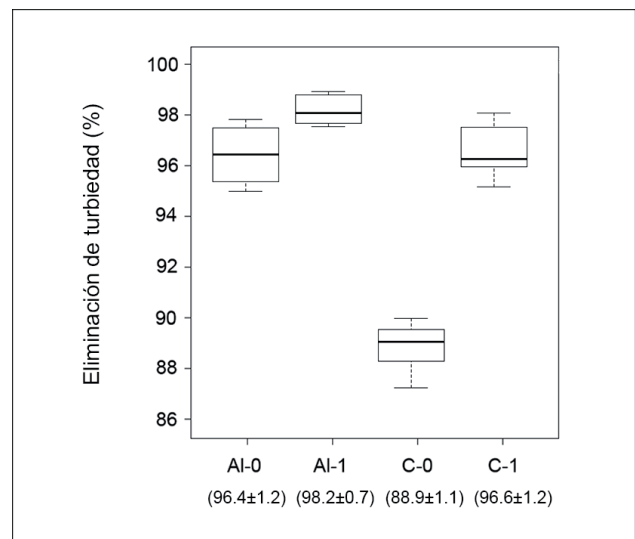


Figura 3. Porcentaje de eliminación de turbiedad en UO que flocularon. Fuente: elaboración propia

En cada prueba del Anova se corroboró normalidad (test de Shapiro-Wilk), homocedasticidad (test de Bartlett) e independencia (autocorrelación simple) de residuales en datos de porcentaje de eliminación de turbiedad.

Tabla 1. Resultados del Anova para el porcentaje de eliminación de turbiedad

Prueba	Valor F $F_{(1,8; \alpha=0.05)} = 5.318$	Valor p $\alpha=0.05$
C-0 vs Al-0	106	6.82×10^{-6}
C-1 vs Al-1	7.146	2.82×10^{-2}
C-0 vs C-1	118.1	4.55×10^{-6}
Al-0 vs Al-1	8.075	2.18×10^{-2}

Fuente: elaboración propia.

Con base en la figura 3 y la tabla 1, al validar H1 del Anova para C-0 vs. Al-0 y C-1 vs. Al-1, y encontrar menor eliminación de turbiedad en C-0 y C-1, respectivamente, afirmamos que el uso de la celda perjudicó la clarificación; así como las reacciones químicas afectan la generación energética [18], [20], las reacciones electroquímicas afectaron la eliminación de turbidez. Sin embargo, se trata de un sacrificio inferior al 3% de la eliminación total si se usa H₂O₂, y es compensado con la generación energética.

Al validar H1 para C-0 vs. C-1, y Al-0 vs. Al-1, y encontrar la mayor eliminación de turbiedad en C-1 y Al-1, respectivamente, se evidencia que se elimina más turbidez al usar H₂O₂. Sin embargo, la figura 3 muestra que aunque el uso de H₂O₂ representó más del 94% de eliminación de turbiedad, sin oxidante (C-0 y Al-0) se logró eliminar al menos un 86%, de modo que así el H₂O₂ mejore la clarificación, la mayor proporción de turbiedad es la eliminada por floculación, gracias a la hidrólisis del aluminio.

Según lo anterior, bajo el sistema propuesto la clarificación sucede por dos factores: floculación y disolución de partículas suspendidas.

2.3. Generación de energía eléctrica

Las celdas Al-H₂O₂ pueden configurar sistemas con potencias desde menos de 1 kW hasta más de 10 kW [12], [13], [20], siendo dispositivos sensibles a cambios de diseño, como el incremento súbito de CE, que puede hacer que un sistema de celdas Al-H₂O₂ pase de generar 1 a 20 kW [13], [26].

El material de los electrodos es otro aspecto clave en el desempeño eléctrico del sistema, por ejemplo, el uso de aleaciones en el ánodo mejora la potencia desarrollada en celdas y baterías de aluminio [11]-[13], [27]; sin embargo, en este experimento se empleó aluminio puro como ánodo, ya que permitió conocer con exactitud el origen de la clarificación por floculación (hidrólisis del aluminio), y el enfoque de este trabajo está en demostrar la aplicabilidad de un sistema electroquímico Al-H₂O₂ al tratamiento de agua, más que en potenciar la generación energética de una celda de este tipo. Respecto al cátodo, el carbono es un material de interés, ya que evita la acumulación de subproductos de la generación energética en la superficie del electrodo [36]; el grafito se puede complementar con materiales como fibras de carbono, grafeno o mezclas de metales para mejorar el desempeño eléctrico de la celda [17], [37].

Las tablas 3 y 4 contienen las ecuaciones de E(t) e I(t), con sus respectivos coeficientes de determinación, cuyas curvas se ilustran en las figuras 4 y 5. A partir de estas funciones se calcularon los valores medios de voltaje e intensidad de corriente, y la carga eléctrica obtenida (tabla 2).

Tabla 2. Voltaje medio, cantidad de electricidad obtenida e intensidad media de corriente eléctrica generada en las celdas

UO	$\bar{E} \text{ (V)}$ $\frac{1}{T} \int_0^T E_{(t)} dt$	$Q \text{ (C)}$ $\int_0^T I_{(t)} dt$	$\bar{I} \text{ (}\mu\text{A)}$ $\frac{Q}{T} \cdot 10^6$
C-0	0.494	2.66	49
C-1	0.613	8.51	157

Fuente: elaboración propia.

En el periodo de observación (T = 15 h), el sistema electroquímico propuesto (C-1) registró voltajes entre 568 y 657 mV, y con ello se obtuvo una carga eléctrica de 8,51 C, suministrada con corrientes entre 101 y 174 μA .

Como se observa en la tabla 2, al usar H₂O₂ (C-1) se alcanzan mejores resultados en cuanto a establecer una diferencia de potencial y generar electricidad. Ello indica que el oxidante, además de mejorar la clarificación, también mejora la generación energética; sin embargo, sin añadir H₂O₂ (C-0) se logró establecer voltaje y generar corriente eléctrica, es decir, el H₂O₂ no es esencial para el funcionamiento de la celda, ni para la clarificación, no obstante, es un agente de mejora significativa en ambos casos.

El menor valor de R² para C-1 en E(t) (tabla 3) indica que con la adición de H₂O₂, aparecen variables que influyen en la diferencia de potencial de la celda, pero no necesariamente la afectan negativamente, ya que, como se aprecia en la tabla 2 y la figura 4, con H₂O₂ (C-1) se mitigó la caída de tensión eléctrica y se obtuvo mayor voltaje medio.

Tabla 3. Funciones de diferencia de potencial (V) establecida por las celdas en t (segundos)

UO	E(t)	R ²
C-0	$14 \cdot 10^{-11}t^2 - 1276 \cdot 10^{-8}t + 0,703$	0,987
C-1	$-35 \cdot 10^{-16}t^3 + 255 \cdot 10^{-12}t^2 - 335 \cdot 10^{-8}t + 0,593$	0,613

Fuente: elaboración propia.

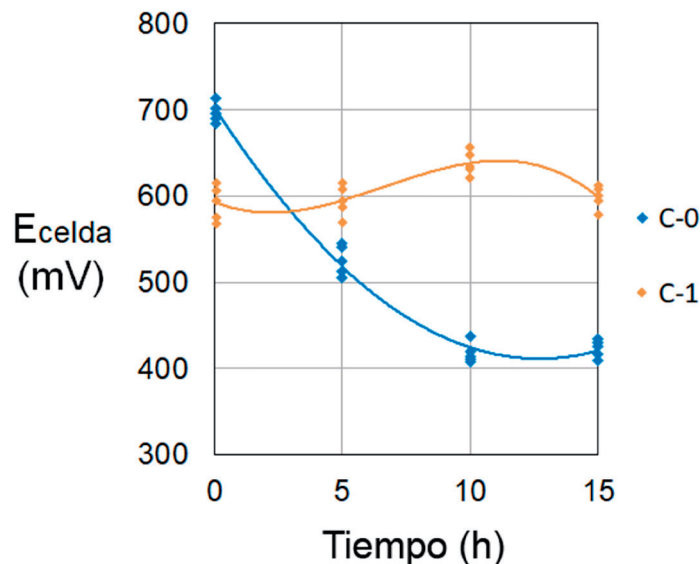


Figura 4. Voltaje de celdas en el periodo de observación T. Fuente: elaboración propia

La caída de voltaje en C-0, que muestra la figura 4, es típica en celdas de aluminio de electrolito acuoso, y se debe a la pasivación del metal, lo cual disminuye su potencial anódico y, por ende, la diferencia de potencial de la celda [11], [13], [26], [28]. El contacto del oxidante con el aluminio genera al instante una película pasivante [30] y ocasiona un menor voltaje en C-1 al iniciar el experimento, pero es más estable y superior al final, tal que en las 15 h de observación no se percibió una caída de tensión equiparable a la de C-0, incluso en C-1 no se registraron voltajes inferiores a 568 mV en todo el periodo de observación, mientras que en C-0 el voltaje cayó por debajo de 500 mV tras las primeras 5 h. Aunque en celdas de doble compartimiento (más complejas y costosas [13], [17], [20]) se alcancen voltajes superiores a 2 V [12], [26], [28], la caída de tensión hace que estas celdas lleguen a los 0,5 V en menos de 5 h [12], [20]; por ello, el único compartimiento es una alternativa llamativa nuestros propósitos.

Las pérdidas de voltaje por pasivación se pueden mitigar con el uso de aleaciones [11]-[13], [27] y evitan el contacto entre oxidante y ánodo [17], [20]. Si se deseara usar el H₂O₂ exclusivamente para generar energía, separándolo del ánodo y el agua que se va a tratar (doble compartimiento sin mejora en clarificación por adición de H₂O₂), la floculación podría llevarse a cabo, ya que, aunque el oxidante mejore la clarificación, la fuente de especies floculantes es el ánodo, y con la floculación se eliminó la mayor proporción de turbiedad, en promedio un 89%.

Algunas especies de aluminio, como el Al(OH)₃, que tienen la aptitud adsorbente que facilita la floculación [14], [15], [31], son los productos iniciales de la corrosión pasivante del metal en un ambiente acuoso [12], [30], por lo que se espera que la caída drástica de tensión eléctrica por pasivación del ánodo ocurra después de desestabilizar la suspensión. Cuando el ánodo se pasiva, se puede remplazar para recargar la celda [12].

Tabla 4. Funciones de intensidad de corriente eléctrica (μA) generada en t segundos por las celdas

U0	I(t)	R ²
C-0	$494 \cdot 10^{-15}t^3 - 38 \cdot 10^{-9}t^2 + 288 \cdot 10^{-6}t + 59,1$	0,737
C-1	$-1288 \cdot 10^{-15}t^3 + 573 \cdot 10^{-10}t^2 - 19 \cdot 10^{-5}t + 158$	0,942

Fuente: elaboración propia.

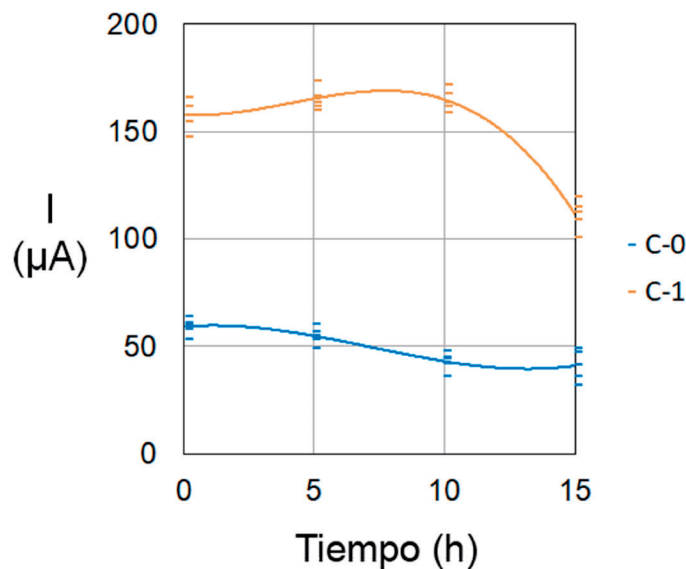


Figura 5. Intensidad de corriente eléctrica generada en T. Fuente: elaboración propia

Las tablas 2 y 4 y la figura 5 evidencian mayor I generada en C-1, debido a la habilidad del H₂O₂ para liberar y atraer electrones, lo cual lo hace un oxidante útil en celdas de único compartimiento [17], tal que logró obtener más del triple de electricidad (Q) que la obtenida sin usar oxidante (C-0). Aun así, tanto en C-0 como en C-1, la I cae; entre las causas de este comportamiento está la formación de burbujas sobre los electrodos, que disminuyen su área activa [20]. Estas burbujas pueden ser H₂ producido, según las ecuaciones 4 y 9, u O₂ liberado en la descomposición homogénea del oxidante [17]; en ambos casos afectan el desempeño eléctrico de la celda [20] y se debe prevenir su aparición sobre los electrodos, por ejemplo, a través de agitación constante, ya que la agitación manual eliminó burbujas al registrar datos, pero no garantiza su posterior aparición; sin embargo, se debe tener cuidado con que la agitación cese en un instante que evite la resuspensión.

A pesar de afectar la generación energética, las burbujas son muestra de la existencia de subproductos aprovechables: el hidrógeno es un recurso energético [27], [29] y el oxígeno, además de poder ocupar el papel de oxidante en la celda una vez agotado el H₂O₂ [12], [17], es un elemento que mejora la calidad del agua [2], [25], y además es demandado en ciertos procesos biológicos de tratamiento de aguas y de generación energética [6], [7].

Algunas celdas de aluminio reportan corrientes de salida superiores a 1 mA [12], lo cual implica que la celda en su forma actual aporta más voltaje que corriente. No obstante, las bajas corrientes obtenidas en diferentes tratamientos de agua se pueden almacenar y entregar en mayor magnitud, ya que la autosuficiencia energética en tratamientos de agua se puede alcanzar al acoplar procesos de obtención de energía en diferentes etapas del tratamiento de agua [6], [7].

La diferencia entre las corrientes de salida obtenidas en laboratorio y las informadas en la literatura puede obedecer, entre otros factores, a que las celdas galvánicas y de combustible suelen trabajar con electrolitos saturados y a temperaturas superiores a 100 °C [12], [13], [20], lo que limita la corriente que se pueda obtener de aguas a temperatura ambiente con baja CE, y ésta (la CE), es un parámetro de calidad de agua que preferiblemente debe ser bajo [2], pero su incremento activa el ánodo [11]. Por ello, debe estudiarse su influencia en el sistema propuesto para mejorar el rendimiento de la celda sin afectar la calidad del agua. Del mismo modo, cada parámetro fisicoquímico y biológico del agua que se va a tratar dará lugar a nuevas dinámicas en el estudio de la generación energética en relación con el tratamiento del agua.

Obtener energía eléctrica (establecer una diferencia de potencial y captar un flujo eléctrico) por vía electroquímica a partir de un tratamiento de clarificación de agua tiene una especial importancia, ya que la transformación directa de energía química a eléctrica, llevada a cabo en celdas electroquímicas que oxidan y reducen contaminantes del agua, ha llamado la atención en los últimos años por las pérdidas que se evitan respecto a la generación de electricidad con múltiples transformaciones (por ejemplo, con biocombustibles) [8], pero el proceso electroquímico que actualmente se aplica a la coagulación-floculación es la electrocoagulación y consume electricidad [10], [15]; mientras que con el sistema propuesto se induce una floculación que genera energía eléctrica en lugar de consumirla. Al ser un tratamiento primario, complementa a los secundarios y aumenta el abanico de procesos de tratamiento de agua susceptibles de obtener energía.

Conclusiones

La hidrólisis de aluminio metálico, usada como reacción anódica de una celda galvánica Al-H₂O₂ de único compartimiento y cátodo de grafito provocó la floculación de un agua con coloides y sólidos disueltos (simulada con una suspensión de arcilla en solución KCl) que actuó como electrolito de la celda y describió un proceso de clarificación de agua con generación de energía eléctrica. El aluminio aportó la carga eléctrica y las especies floculantes; mientras que el H₂O₂ fue un agente de mejora tanto en el tratamiento como en la generación energética, ya que mitigó la caída de voltaje, aumentó la electricidad obtenida, y al solubilizar partículas suspendidas, eliminó turbidez adicional a la eliminada por floculación.

El sistema electroquímico propuesto generó un voltaje medio de 0,613 V y una carga eléctrica de 8,51 C suministrada en 15 h a una intensidad media de 157 µA; también eliminó por floculación 88,9 ± 1,1% de turbidez del agua objeto de tratamiento, y un 7,8% adicional por disolución de partículas suspendidas. Pese a los criterios de diseño que mejoran la generación energética, al vincular la celda al tratamiento de agua aparecen nuevos retos, como prevenir la aparición de burbujas sobre los electrodos sin que haya resuspensión coloidal, aumentar la I generada sin afectar la calidad del agua por incremento de CE, mitigar las pérdidas de voltaje por pasivación del ánodo en un medio acuoso y neutro que controle la toxicidad del aluminio, y demás dinámicas que surgen de las propiedades del agua que se va a tratar en la celda.

La clarificación de agua por floculación y disolución, con generación de energía eléctrica en lugar de consumo, es un aporte novedoso a las tecnologías de obtención de energía en tratamientos de agua, donde se aprovechan subproductos de una transformación directa de energía química a eléctrica, para brindar un tratamiento primario al agua.

Agradecimientos

A la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, que facilitó los laboratorios de química, calidad del agua y tecnologías limpias para la realización de este proyecto.

Referencias

- [1] A. M. Hamiche y A. B. Stambouli, "A review of the water-energy nexus", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 319-331, Nov. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.020>.
- [2] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-Water Quality*, 4th ed., Geneva, Switzerland: WHO, 2018.
- [3] D. Mara, J. Lane, B. Scott y D. Trouba, "Sanitation and health", *PLoS Med.*, vol. 7, n.º 11, e1000363, Nov. 2010, <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000363>.
- [4] Organización Mundial de la Salud, *Agua, saneamiento e higiene para acelerar y sostener el progreso respecto de las enfermedades tropicales desatendidas: una estrategia mundial 2015-2020*, Geneva, Switzerland: WHO, 2015.
- [5] Organización Panamericana de la Salud, *Agua y saneamiento: Evidencias para políticas públicas con enfoque en derechos humanos y resultados en salud pública*, Washington D. C., USA: WHO, 2011.

- [6] Y. Gu, Y. Li, X. Li, P. Luo, H. Wang, Z. P. Robinson, X. Wang, J. Wu y F. Li, "The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants", *Appl. Energy*, vol. 204, pp. 1463-1475, Oct. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.069>.
- [7] V. G. Gude, "Energy and water autarky of wastewater treatment and power generation systems", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 52-68, May. 2015, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.055>.
- [8] X. Yang, Z. Fan, H. Zhang, W. Xu y Z. Wu, "Energy harvest from contaminants via coupled redox fuel cells", *Energy Procedia*, vol. 205, pp. 1852-1857, May. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.542>.
- [9] N. Diaz-Elsayed, N. Rezaei, T. Guo, S. Mohebbi y Q. Zhang, "Wastewater-based resource recovery technologies across scale: A review", *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 145, pp. 94-112, Jun. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.035>.
- [10] E. Butler, Y. Hung, R. Y. Yeh y M. S. Al Ahmad, "Electrocoagulation in wastewater treatment", *Water*, vol. 3, n.º 1, pp. 495-525, Apr. 2011, <https://doi.org/10.3390/w3020495>.
- [11] E. I. Shkolnikov, A. Z. Zhuky M. S. Vlaskin, "Aluminum as energy carrier: Feasibility analysis and current technologies overview", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n.º 9, pp. 4611-4623, Dec. 2011, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.091>.
- [12] G. A. Elia, K. Marquardt, K. Hoepfner, S. Fantini, R. Lin, E. Knipping, W. Peters J. F. Drillet, S. Passerini y R. Hahn, "An overview and future perspectives of aluminum batteries", *Adv. Mater.*, vol. 28, n.º 35, pp. 1-16, Jun. 2016, <https://doi.org/10.1002/adma.201601357>.
- [13] Q. Li y N. J. Bjerrum, "Aluminum as anode for energy storage and conversion: a review", *J. Power Sources*, vol. 110, n.º 1, pp. 1-10, Jul. 2002, [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)01014-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)01014-X).
- [14] J. Bratby *Coagulation and Flocculation with Water and Wastewater Treatment*. 3rd ed., London, UK: IWA Publishing, 2016.
- [15] C. Y. Teh, P. M. Budiman, K. P. Y. Shak y T. Y. Wu "Recent advancement of coagulation-flocculation and its application in wastewater treatment", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 55, n.º 16, pp. 4363-4369, Mar. 2016, <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04703>.
- [16] M. C. Collivignarelli, R. Pedrazzani, S. Sorlini, A. Abbà y G. Bertanza, "H₂O₂ based oxidation processes for the treatment of real high strength aqueous wastes", *Sustainability*, vol. 9, n.º 2, pp. 553-560, Feb. 2017, <https://doi.org/10.3390/su9020244>.
- [17] L. An, T. Zhao, X. Yan, X. Zhou y P. Tan, "The dual role of hydrogen peroxide in fuel cells", *Sci. Bull.*, vol. 60, n.º 1, pp. 55-64, Jan. 2015, <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0694-7>.
- [18] N. B. Pulsone, D. P. Hart, A. M. Siegel, J. R. Edwards y K. E. Railey, "Aluminum-water energy system for autonomous undersea vehicles". *Lincoln Lab. J.*, vol. 22, n.º 2, pp. 79-90. [en línea]. Disponible: https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/page/doc/2018-06/22_2_5_Pulsone.pdf
- [19] O. Hasvold, K. H. Johansen y K. Vestgaard, "The alkaline aluminium hydrogen peroxide semi-Fuel Cell for the Hugin 3000 autonomous underwater vehicle", presented at the Proc. 2002 Workshop Autonomous Underw. Vehicles, San Antonio, TX, USA, Jun. 21, 2002. <https://doi.org/10.1109/AUV.2002.1177209>.
- [20] D. J. Brodrecht y J. J. Rusek "Aluminum-hydrogen peroxide fuel-cell studies", *Appl. Energy*, vol. 74, n.º 1-2, pp. 113-124, Jan.-Feb. 2003, [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(02\)00137-X](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00137-X).
- [21] L. C. Alfonso y B. A. Ordóñez, "Implementación de oxidantes (MIOX, NaClO, H₂O₂) para el mejoramiento de los procesos de coagulación y floculación de aguas residuales en la planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre", B. S. thesis, *Proy. Curric. Lic. Quím.*, Univ. Dist. Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, 2014.
- [22] S. A. Khaleefa-Ali "Dye removal from wastewater", *Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Technol*, vol. 3, n.º 5, pp. 20-26, Jul.-Aug. 2017. [En línea]. Disponible: <http://ijsrset.com/paper/2728.pdf>
- [23] World Health Organization, *Water Quality and Health-Review of Turbidity: Information for regulators*, 2017. [En línea]. Disponible: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/254631/WHO-FWC-WSH-17.01-eng.pdf>

- [24] W. Zhang, X. Tang, Q. Xian, N. Weisbrod, J. E. Yang y H. Wang, "A field study of colloid transport in surface and subsurface flows", *J. Hydrol.*, vol. 542, pp. 101-114, Nov. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.056>.
- [25] L. E. Gualdrón, "Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros fisicoquímicos y biológicos", *Din. Ambient.*, n.º 1, pp. 83-102, Dec. 2018, <https://doi.org/10.18041/2590-6704/ambiental.1.2016.4593>
- [26] R. F. Benson, A. M. Cárdenas y L. C. Langebrake, "Aluminum and solid alkali peroxide galvanic cell", US Patent 7 855 015, Dec. 21, 2010 [En línea]. Disponible: <https://patents.google.com/patent/US7855015>
- [27] D. Raptis, A. K. Seferlis, V. Mylona, C. Politis y P. Lianos, "Electrochemical hydrogen and electricity production by using anodes made of commercial aluminum", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, n.º 3, pp. 1359-1365, Jan. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.202>.
- [28] A. Silberman, V. Kalzuzhny, I. Cantero, M. Bengoechea y J. Blazquez, "Al/H₂O₂ battery", Jun. 15, 2011 [En línea]. Disponible: <https://patents.google.com/patent/EP2333884A1/en>
- [29] V. Shmelev, V. Nikolaev, J. H. Lee y C. Yim, "Hydrogen production by reaction of aluminum with water", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, n.º 38, pp. 16664-16673, Oct. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.159>.
- [30] M. T. Baile, "Estudio del comportamiento frente a la corrosión", en Estudio de la conformación de componentes aluminio-silicio en estado semisólido., Doctoral thesis, Dept. Cienc. Mater., Univ. Politèc. Catalunya, Barcelona, España, 2005 [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/2117/93359>
- [31] J. Saukkoriipi, "The hydrolysis of aluminum in aqueous environments", en Theoretical study of the hydrolysis of aluminum complexes, Oulu, Finlandia: Acta Univ. Oul., 2010. [En línea]. Disponible: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789514261831.pdf>
- [32] C. Exley, "The toxicity of aluminium in humans", *Morphologie*, vol. 100, n.º 329, pp. 51-55, Jun. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.morpho.2015.12.003>.
- [33] S. D. W. Comber, M. J. Gardner y J. Churchley, "Aluminiumspeciation:implicationsofwastewater effluent dosing on river water quality", *Chem. Speciat. Bioavailab.*, vol. 17, n.º 3, pp. 117-128, 2005, <https://doi.org/10.3184/095422905782774874>.
- [34] L. L. Zeng, Z. S. Hong, C. Wang y Z. Z. Yang, "Experimental study on physical properties of clays with organic matter soluble and insoluble in water", *Appl. Clay. Sci.*, vol. 132-133, pp. 660-667, Nov. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.018>.
- [35] S. Rihs, A. Gontier, E. Lascar, A. Biehler, y M. P. Turpault, "Effect of organic matter removal on U-series signal in clay minerals", *Appl. Clay. Sci.*, vol. 147, pp. 128-136, Oct. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.07.016>.
- [36] R. Mori, "Electrochemical properties of a rechargeable aluminum-air battery with a metal-organic framework as air cathode material", *RSC Adv.*, vol. 7, n.º 11, pp. 6389-6395, Jan. 2017, <https://doi.org/10.1039/c6ra25164a>.
- [37] R. Mckerracher, A. Holland, A. Cruden, y R. G. A. Wills, "Comparison of carbon materials as cathodes for the aluminium-ion battery", *Carbon*, vol. 144, pp. 333-341, Apr. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.12.021>.