

Desarrollo de un prototipo solar para el tratamiento de aguas residuales mediante el proceso de electro-floculación

Development of solar prototype for wastewater treatment using electro-flocculation process

SANDOVAL-SALAS, Fabiola†*, GARCÍA-HERNÁNDEZ, José Angel, MÉNDEZ-CARRETO, Carlos y JIMÉNEZ-ALVAREZ, José Alfredo

Instituto Tecnológico Superior de Perote, División de Ingeniería Electromecánica, Subdirección de Posgrado e Investigación

ID 1^{er} Autor: *Fabiola, Sandoval-Salas* / ORC ID: 0000-0001-9267-4974, CVU CONACYT ID: 71814

ID 1^{er} Coautor: *José Angel, García-Hernández* / ORC ID: 0000-0002-5986-7181, CVU CONACYT ID: TNM IT17A558

ID 2^{do} Coautor: *Carlos, Méndez-Carreto* / ORC ID: 0000-0002-2897-4435 CVU CONACYT ID: 227409

ID 3^{er} Coautor: *José Alfredo, Jiménez-Álvarez* / ORC ID: 0000-0002-0875-2616 CVU CONACYT ID: TNM IT16D898

Recibido 3 de Febrero, 2018; Aceptado 30 Marzo, 2018

Resumen

Las fuentes inagotables de energía, en la actualidad ofrecen un campo extenso para el eficientamiento de procesos convencionales, además de ser amigables para otros procesos de nueva generación como son los electroquímicos. Para generar un proceso electroquímico como el de electro-floculación, se desarrolla un prototipo solar con la cualidad de ser sostenible a partir de energía limpia e inagotable, el mismo prototipo también cuenta con la cualidad de poder suministrar energía al proceso a partir de la red eléctrica convencional de 127 V AC – 60 Hz. El prototipo solar es capaz de regular una tensión desde los 1.25 V DC hasta los 37 V DC, con una corriente constante de hasta 1.5 A. La finalidad es inducir corriente eléctrica a través de una serie de electrodos de un material conductor a aguas residuales para su posterior análisis mediante procesos químicos como la DQO (Demanda Química de Oxígeno) y los niveles de absorbancia con el uso de diferentes instrumentos de laboratorio.

Electro-Floculación, Electroquímico, Prototipo

Abstract

The inexhaustible sources of energy currently offer an extensive field for the efficiency of conventional processes, in addition to being friendly to other processes of new generation such as electrochemicals. To generate an electrochemical process such as electro-flocculation, a solar prototype is developed with the quality of being sustainable from clean and inexhaustible energy, the same prototype has the quality of being able to supply energy to processes from the conventional electrical network of 127 V AC – 60 Hz. The solar prototype is capable of regulating a voltage from 1.25 V DC to 37 V DC, with a constant current of up to 1.5 A. The purpose is to induce electric current through a series of electrodes from a conductive material to wastewater for further analysis by chemical process such as COD (Chemical Oxygen Demand) and absorbance levels with the use of different laboratory instruments.

Electro-Flocculation, Electrochemical, Prototype

Citación: SANDOVAL-SALAS, Fabiola, GARCÍA-HERNÁNDEZ, José Ángel, MÉNDEZ-CARRETO, Carlos y JIMÉNEZ-ALVAREZ, José Alfredo. Desarrollo de un prototipo solar para el tratamiento de aguas residuales mediante el proceso de electro-floculación. *Revista de Energías Renovables* 2018. 2-4:1-7

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: investiga.itspe@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

1. Introducción

La disponibilidad del agua depende no solo de la cantidad, sino también de su calidad. Aunque haya agua, si está contaminada y se encuentra en una condición tal que sea no acorde con el uso que se le quiere dar, su empleo se limita (Cabildo *et al.*, 2008). Actualmente, los avances científicos y tecnológicos han repercutido en el desarrollo de técnicas analíticas y procesos capaces de identificar y de remover una amplia lista de componentes, a tal grado que es posible hacer agua “potable” mediante la depuración del agua residual.

Queda aún mucho por lograr en términos del mejoramiento de la calidad y la distribución de la cantidad, tanto en el Tercer Mundo como en los países desarrollados, en aspectos que pueden ser similares o muy diferentes. Los retos actuales abarcan desde el suministro de agua microbiológicamente aceptable, mediante el empleo de procesos sencillos (como cloración) hasta el desarrollo de sofisticados métodos de control para remover contaminantes complejos de daño a largo plazo, e incluso, de efectos poco conocidos (Cisneros, 2001).

El propósito principal del tratamiento del agua residual es remover el material contaminante, orgánico e inorgánico, el cual puede estar en forma de partícula en suspensión y/o disueltas, con objeto de alcanzar una calidad del agua requerida por la normativa de descarga o por el tipo de reutilización a la que se destinará (Cabildo *et al.*, 2008).

El objetivo de depurar un agua residual se logra mediante la integración de operaciones (físicas) y procesos (químicos y biológicos) unitarios, que serán seleccionados en función de las características del agua residual a tratar y de la calidad deseada del agua tratada. Por otro lado, los requerimientos de insumos, tales como energía eléctrica y reactivos químicos, se darán en función de las tecnologías seleccionadas para integrar el sistema de tratamiento, y por ende, el costo de operación dependerá también de ello (Cabildo *et al.*, 2008). Los tratamientos fisicoquímicos y biológicos, los primeros como su nombre lo indica, hacen uso de procesos físicos (uso de la gravedad, filtración por retención física, atracción electrostática, etc.) y de procesos químicos (coagulación, absorción, oxidación, precipitación, etc.) (Cabildo *et al.*, 2008; Díaz, 2014).

El segundo tipo involucra la degradación o transformación del material orgánico por medio de microorganismos. Dentro de los sistemas biológicos existen los sistemas aerobios (requieren oxígeno molecular disuelto) y los anaerobios (funcionan sin oxígeno). Un rubro aparte merece los sistemas naturales construidos, los cuales aprovechan las transformaciones que se llevan a cabo en el medio natural, solamente que en estas unidades se busca incrementar su capacidad de tratamiento en unidades de proceso controladas. Tal es el caso de los humedales artificiales o el tratamiento mediante descargas directas a suelo (Noyola *et al.*, 2013; Sahu & Chaudhari, 2015).

La ingeniería Electroquímica es una disciplina científica y tecnológica que tiene como objeto de estudio del diseño y la operación de los equipos y procesos en los que se produce interconversión entre energía química y eléctrica (Díaz, 2014; Taborda *et al.*, 2011). Los primeros años de vida de la ingeniería electroquímica han coincidido con una mayor sensibilización social hacia la conservación del medio ambiente. Así, las legislaciones de los distintos países comenzaron a poner límites al vertido de residuos, lo que conllevó la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías de tratamiento de vertidos, más eficaces en cuanto a resultados y a costos (Díaz, 2014).

De este modo, comenzaron a estudiarse las primeras aplicaciones medioambientales de la ingeniería electroquímica, en las que se utilizaban estas tecnologías para el tratamiento de efluentes líquidos, gaseosos y de suelos. Los procesos electroquímicos de remediación ambiental presentan una serie de ventajas respecto a las tecnologías no electroquímicas, con las que entran en competencia. Los procesos electroquímicos, es importante resaltar que no es cierta la idea generalizada entre los técnicos y los industriales de que se trata de una tecnología cara (Díaz, 2014).

El objetivo fue diseñar y construir un equipo de electrooxidación para tratamiento de agua residual, el cual considera un dispositivo controlador de corriente, un sistema de captación de energía solar mediante un panel fotovoltaico, una batería, un sistema de descarga de corriente, y electrodos.

En el diseño y construcción del dispositivo controlador de corriente para el tratamiento de aguas residuales por electrooxidación se empleó como suministro de energía un panel solar, una batería de 12V, una toma de corriente a 127 VAC y distintos dispositivos electrónicos pasivos y activos, así como software de diseño y simulación, además de instrumentos de medición.

2. Descripción del equipo

El equipo cuenta con un suministro de energía a través de un panel fotovoltaico, una conexión a 127 VAC, un dispositivo controlador de carga y descarga de corriente, además de una celda de floculación que se divide en tres partes, zona de flotación, zona de reacción y una zona de sedimentación. Dentro de la zona de reacción es donde colocamos los electrodos de material conductor. La conexión de los distintos elementos se puede mostrar dentro de la *figura 1*. Así mismo se puede observar las dimensiones de la celda de floculación.

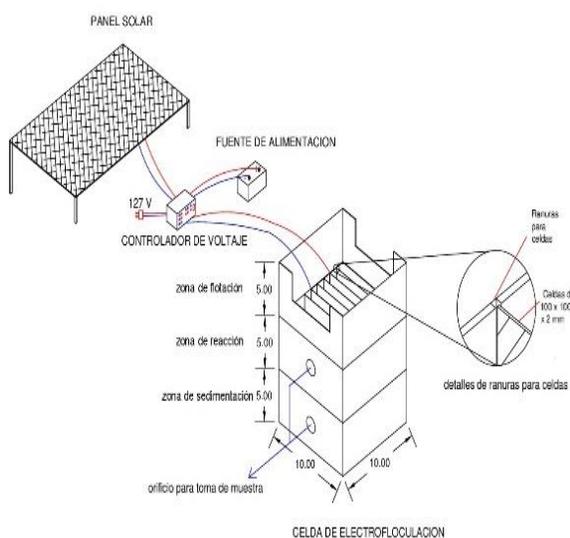


Figura 1 Diagrama de equipo de electrooxidación

Fuente: *Elaboración Propia*

Diseño del dispositivo controlador de carga y descarga para el proceso de electrooxidación

Las fuentes de energía eléctrica primarias habituales son la red eléctrica y las baterías (acumuladores recargables y pilas). La red eléctrica ofrece una tensión alterna (sinusoidal) de amplitud y frecuencia constantes: 230 V (eficaces) y 50 Hz en la Europa continental, 127 V (eficaces) y 60 Hz en América (Areny, 2006).

Tomando en cuenta las fuentes de energía, que en este caso son la red eléctrica y una fuente renovable para la captación de energía solar a través de un panel fotovoltaico, tales fuentes de energía suministrarán la corriente necesaria a un acumulador de 12 VDC.

El diseño del controlador de corriente todo está a cargo de un regulador de voltaje variable que es el LM317 (Semiconductors, 2006). Se requieren voltajes regulados que sean variables para fuentes de laboratorio, voltajes que no estén disponibles como reguladores estándar de voltaje fijo, un voltaje ajustable de mucha precisión y ofrecer a los usuarios que desean tener gran cantidad de un tipo de regulador de circuito integrado para obtener varios voltajes regulados de salida (Coughlin & Driscoll, 1999). Están disponibles reguladores de voltaje en configuraciones que permiten al usuario establecer el voltaje de salida a un valor regulado deseado. El LM317, por ejemplo se puede operar con el voltaje de salida regulado a cualquier valor dentro del intervalo de 1.25 V a 37 V (Boylestad & Nashelsky, 2003).

Este regulador de voltaje requiere solo dos resistencias externas para establecer el voltaje de salida. La *figura 2* muestra cómo se puede ajustar el voltaje de salida regulado de un LM317.

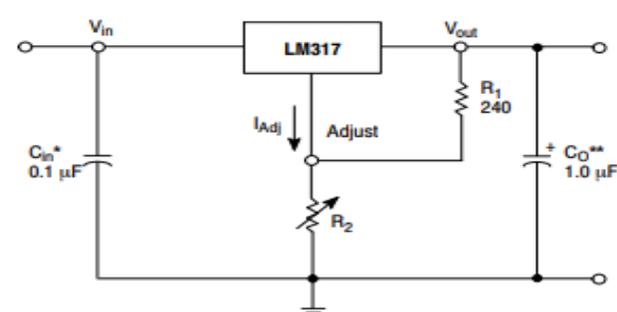


Figura 2 Aplicación estándar

Fuente (Semiconductors, 2006)

El LM317 es un regulador flotante de 3 terminales. En operación, el LM317 desarrolla y mantiene un valor nominal de 1.25 V de referencia (V_{ref}) entre sus terminales de salida y ajuste. Esta tensión de referencia se convierte en una corriente de programación (IPROG) por R_1 (vea la *figura 3*), y esta corriente constante fluye a través de R_2 a tierra. La tensión de salida regulada está dada por:

$$V_{out} = V_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{Adj} R_2 \quad (1)$$

Como la corriente del terminal de ajuste (I_{Adj}) representa un término de error en la ecuación, el LM317 fue diseñado para controlar I_{Adj} menores de $100\mu A$ y mantenerlo constante. Esto impone el requisito de una corriente de carga mínima. Si la corriente de carga es menor que este mínimo, la tensión de salida aumentara

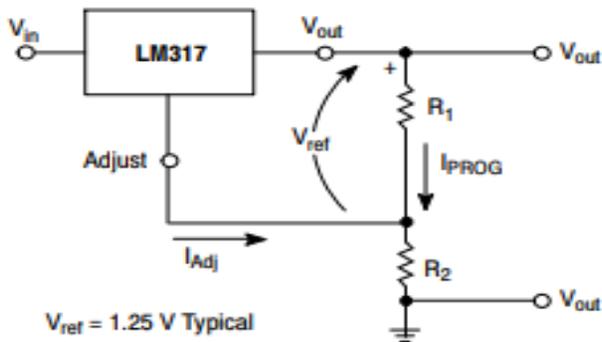


Figura 3 Configuración básica del circuito
Fuente: (Semiconductors, 2006)

El LM317 es capaz de proporcionar una regulación de carga extremadamente buena, pero se requieren algunas precauciones para obtener un rendimiento máximo. Para un mejor rendimiento, la resistencia de programación (R_1) debe conectarse lo más cerca posible del regulador para minimizar las caídas de línea que aparecen efectivamente en serie con la referencia, degradando así la regulación. El extremo de tierra de R_2 puede ser devuelto cerca de la tierra de carga para proporcionar detección de tierra remota y mejorar la regulación de la carga (Semiconductors, 2006).

Normalmente, no se necesitan condensadores a menos que el dispositivo este situado a más de 6 pulgadas de los condensadores del filtro de entrada, en cuyo caso se necesita una derivación de entrada. Se puede agregar un condensador de salida opcional para mejorar la respuesta transitoria. El terminal de ajuste puede ser desviado para lograr relaciones de rechazo de ondulación muy altas que son difíciles de lograr con los reguladores de 3 terminales estándar. El regulador de voltaje LM317 según la configuración deseada con diferentes elementos, ya sean pasivos o discretos puede proporcionar aplicaciones de utilidad, mejorando de esta manera a los reguladores fijos de tres terminales. Además, hace un regulador de conmutación ajustable especialmente simple, un regulador de salida programable o conectando una resistencia fija entre el pasador de ajuste y salida, el LM317 se puede usar como un regulador de corriente de precisión.

Una de las configuraciones del LM317 es un regulador de corriente de precisión, con lo cual podemos utilizar dicha configuración para así diseñar y suministrar una corriente constante a una batería. La resistencia en serie limita la salida de corriente del LM317, lo que minimiza el daño a la batería (Instruments, 2004). Véase figura 4.

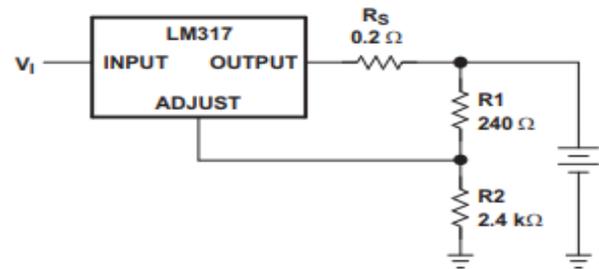


Figura 4 Circuito cargador de batería
Fuente: (Instruments, 2004)

$$V_{OUT} = 1.25V \left(\frac{R_2}{R_1 + 1} \right) \quad (2)$$

$$I_{OUT}(short) = \frac{1.25V}{R_S} \quad (3)$$

$$Output\ impedance = R_S \left(\frac{R_2}{R_1 + 1} \right) \quad (4)$$

3. Pruebas electrónicas del dispositivo controlador de carga y descarga para el proceso de electrooxidación

Las configuraciones del regulador de voltaje LM317 se montaron en una protoboard para verificar el correcto funcionamiento de los circuitos, tanto como el circuito que controla la carga de nuestra batería, así como el regulador de tensión que regula la corriente dentro de la celda de floculación en la zona de reacción.

Se realizaron las conexiones necesarias para montar el panel fotovoltaico de 20 watts el cual genera 100 watts hora por día con un voltaje máximo de salida de 17.4 V con una corriente de 0.87 A al circuito controlador de carga y verificar la corriente que suministrara a una batería sellada de ácido-plomo de 12 VCC de 12 Ah que soporta hasta 300 °C con un peso nominal de 3,93 kg. Además se verifico la corriente suministrada a partir de la red eléctrica de 127 VAC. Las mediciones de tensión y corriente fueron medidas con un multímetro digital marca Steren® modelo MUL-270 (precisión en CD de $\pm 0.5\%$, resolución de $0.1\mu A$ para pequeñas corrientes y amplio rango de medición en corriente 20 A). Como se puede observar en las figuras 5 y 6.



Figura 5 Conexión del panel fotovoltaico al controlador de carga

Fuente: *Elaboración Propia*

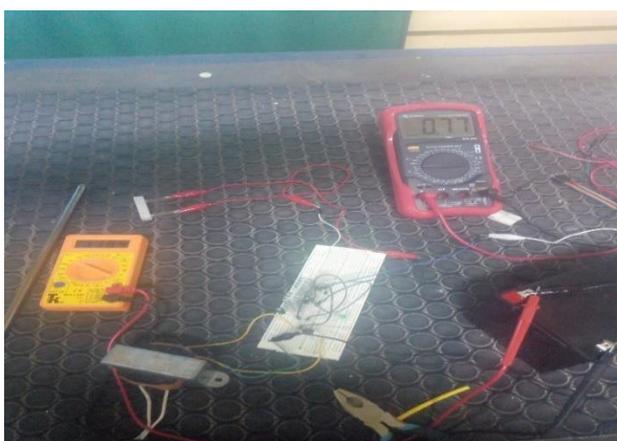


Figura 6 Conexión a la red eléctrica al dispositivo controlador de carga

Fuente: *Elaboración Propia*

Montaje de los dispositivos electrónicos en la placa de circuito impreso

Una vez que se realizaron las pruebas al controlador de carga y el correcto funcionamiento de este, se montaron los circuitos dentro de una placa PCB (Printed Circuit Board). Dentro de la placa de circuito impreso se montaron todos los componentes necesarios. La placa se realizó en el software de LIVEWIRE®. En dicha placa se puede observar la distribución de los diferentes dispositivos electrónicos en el layout real world. Figura 7.

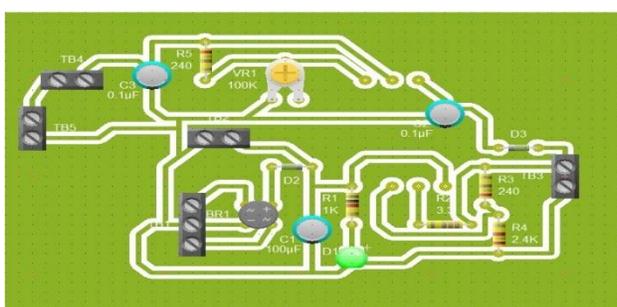


Figura 7 Real world layout.

Fuente: *Elaboración Propia*

ISSN: 2523-6881

ECORFAN® Todos los derechos reservados

El layout con el que se trabaja para la técnica de planchado en placa fenólica tiene que ser de tipo atwork, tal layout también fue realizado mediante el software de LIVEWIRE®. Como se puede apreciar en la figura 8, así se muestran las pistas y conexiones entre los diferentes dispositivos electrónicos.

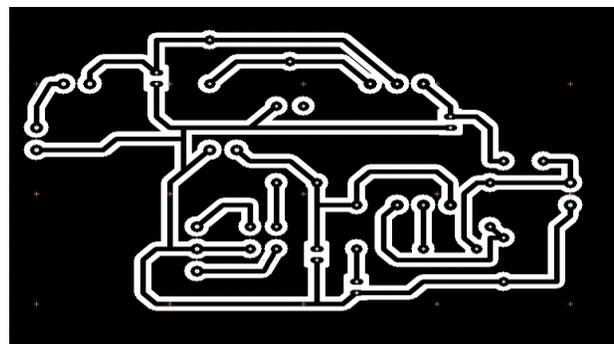


Figura 8 Layout Atwork.

Fuente: *Elaboración Propia*

4. Pruebas de operación del equipo

Metodología

Las muestras de aguas que se utilizaron para la evaluación del funcionamiento del equipo se colectaron del efluente proveniente de la colonia Libertad, municipio de Perote. Se tomaron en recipientes contenedores con capacidad de 1L. Se consideraron tres diferentes separaciones entre los electrodos: 10 mm, 20 mm y 30 mm.

Las pruebas se realizaron durante 50 min y se tomaron muestras a intervalos de 5 min. Como variable de respuesta se determinó la concentración de DQO lo cual constituye un método analítico habitual para la determinación de materia orgánica biodegradable y no biodegradable en aguas residuales, mediante el método HACH 8000.

La Demanda Química de Oxígeno (DQO), se utiliza para medir la cantidad de oxígeno equivalente en la materia orgánica que puede ser oxidada, y se expresa en mg de O₂ que se requiere para oxidar la materia orgánica de 1 litro de agua (Cabildo *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2017).

La DQO se determinó en un equipo HACH DRB200 (certificaciones de cumplimiento CE, cTUVus, tasa de calentamiento de 20 a 150 °C en 10 minutos, rango de temperatura 37-165 °C (99-329 °F), estabilidad de temperatura de ± 2 °C, requerimiento de voltaje 115 V AC, 50-60 Hz) de acuerdo a las instrucciones del fabricante y se leyó la absorbancia en un Espectrofotómetro JENWAY 6305 (Longitud de Onda: rango de 198 a 1000 nm, resolución de 1nm, exactitud de ± 2 nm, Fotometría: absorban cia de -0.300 a 1.999 A, resolución de 0.1 %T, 0.001 A) a 620 nm.

5. Resultados de las pruebas de operación

Los resultados de la operación de las pruebas electrónicas del dispositivo se observan en Gráficos 1, 2 y 3, para cada apertura de los orificios en los electrodos de 10, 20 y 30 mm, respectivamente.

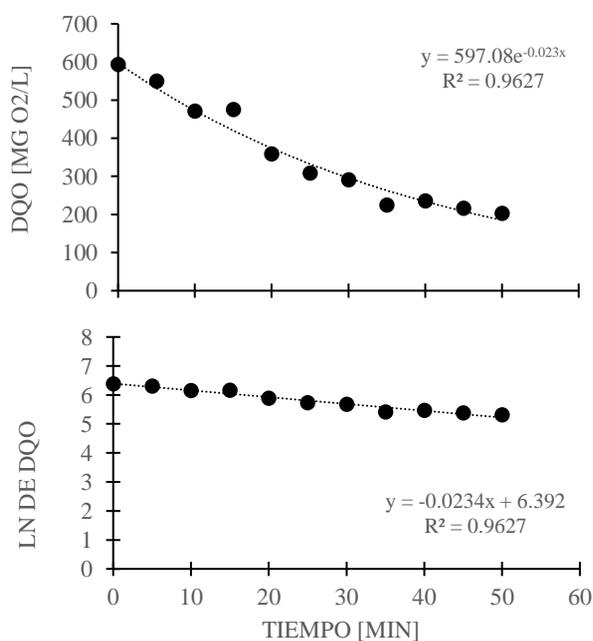


Gráfico 1 Cinética de remoción de DQO y cálculo de velocidad para apertura entre electrodos de 10 mm
Fuente: Elaboración Propia

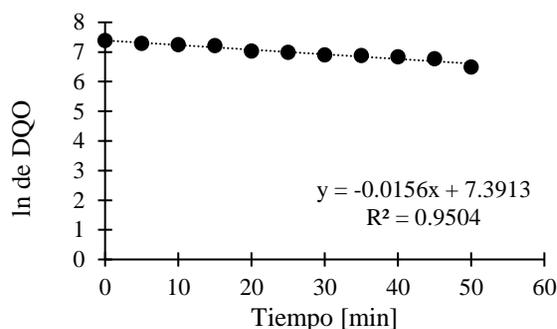
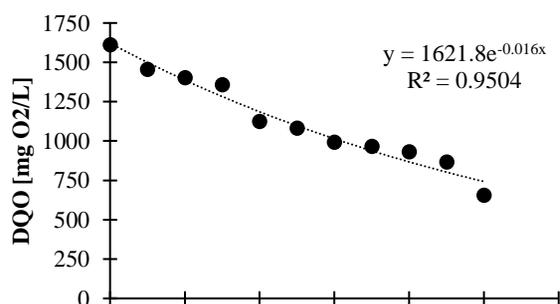


Gráfico 2 Cinética de remoción de DQO y cálculo de velocidad para apertura entre electrodos de 20 mm
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3 Cinética de remoción de DQO y cálculo de velocidad para apertura entre electrodos de 30 mm
Fuente: Elaboración Propia

En las pruebas de ejecución del equipo se encontró que la remoción de la DQO del agua residual tiene un comportamiento logarítmico. A diferentes separaciones entre los electrodos se tienen diferentes velocidades de remoción, como se muestra en la Tabla 1.

Apertura	Velocidad	% de remoción
10 mm	$y = -0.0234x + 6.392$	65.81%
20 mm	$y = -0.0156x + 7.3913$	59.36%
30 mm	$y = -0.0149x + 7.6129$	44.01%

Tabla 1 Comparativo de apertura de electrodos, velocidad y porcentaje de remoción
Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a lo reportado en la literatura, Garay and Gómez (2016) encontraron que la utilización de cargas eléctricas (15 V) reduce hasta en un 97.57% la Demanda Química de Oxígeno, Sahu and Chaudhari (2015), consiguieron reducir en un 84% la concentración de DQO; por otra parte Yang *et al.* (2017), reportaron una remoción del 75.34% con el método electroquímico en el tratamiento de aguas residuales, lo que tiene relación con lo que se reportó en el presente estudio.

Conclusiones

El diseño del prototipo solar puede regular una tensión desde 1.25 V DC hasta 37 V DC, con corriente constante de 1.5 A. En cuanto al comportamiento de la DQO se puede observar que a menor separación entre los electrodos se tiene una mayor velocidad de remoción. Esto se explica porque la resistencia de carga disminuye y la corriente suministrada por el equipo aumenta. Un proceso contrario a una mayor apertura, donde, la velocidad de remoción disminuye, ya que, la resistencia de carga se vuelve mayor y la corriente suministrada por el equipo disminuye. En lo que refiere al manejo del equipo, es ligero, portable por sus dimensiones y de fácil manejo para el usuario.

Referencias

Areny, R. P. (2006). *Instrumentos electrónicos básicos*: Marcombo. 8426713904. 317 pp.

Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2003). *Electrónica, Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*: Pearson Educación. 9702604362. 1020 pp.

Cabildo, M. M. P., Vallespi, V. R. M. C., Cornago, R. M. P., Escolástico, L. C., Esteban, S. S., Farrán, M. M. Á., . . . Sanz, d. C. D. (2008). *Reciclado Y Tratamiento de Residuos*: UNED. 9788436260069. 393 pp.

Cisneros, B. J. (2001). *Contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México: LIMUSA SA. Id. 29443. 926 pp.

Coughlin, R. F., & Driscoll, F. F. (1999). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*: Pearson Educación. 9701702670. 538 pp.

Díaz, C. E. B. (2014). *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. México: Reverté. 8429179186. 317 pp.

Garay, M. B., & Gómez, O. T. (2016). Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada. *Revista Industrial Data*, 19(2), 91-95.

Instruments, T. (2004). LM117/LM317A/LM317-N 3-Terminal Adjustable Regulator. *LM317 datasheet*, May.

Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca, L. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales: Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. México: Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y IDRC. 9786070248221. 140 pp.

Sahu, O., & Chaudhari, P. (2015). Electrochemical treatment of sugar industry wastewater: COD and color removal. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 739, 122-129.

Semiconductors, O. (2006). LM317, 1.5 A Adjustable Output, Positive Voltage Regulator: USA.

Taborda, G., Zuluaga, V., Palomá, L., & González, J. P. P. (2011). Aplicación de métodos electroquímicos en la remoción de materia orgánica en los jugos producto del beneficio del fique: alternativa biotecnológica para mitigar la contaminación en los afluentes hídricos. *Nova*, 9(16), 166-169.

Yang, M., Jing, B., Chen, W., Li, Q., & Yin, X. (2017). Experimental Study on COD Composition and Electrochemical Degradation of Wastewater in Offshore Oilfields. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 64(1), 73-79.