

Tratamiento de efluentes de la producción industrial de alcohol etílico en celdas de combustible microbianas

Effluent treatment of alcohol industrial production in microbial fuel cells

Muñoz B, Juan A¹., Páez O, María E¹, Reyes C, Luz K¹., Botello S, Wilmar A. ² Peña P, Sergio A³.

Fundación Universitaria de San Gil – UNISANGIL

Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Programa de Ingeniería Ambiental
San Gil, Colombia

juanmunoz@unisangil.edu.co
mariapaez1@unisangil.edu.co
luzreyes@unisangil.edu.co
wbotello@unbosque.edu.co
spena@unisangil.edu.co

Fecha de Recepción: junio 26 de 2020

Fecha de Aceptación: agosto 31 de 2020

Resumen — Las vinazas, un residuo de la producción de alcohol etílico y alcohol carburante, altamente contaminante, pueden ser tratadas en sistemas basados en digestión anaerobia. Con el fin de degradar la materia orgánica contenida en la vinaza, se pueden utilizar Celdas de Combustible Microbianas – CCM y obtener de manera adicional, energía eléctrica. En este proyecto se diseñaron y construyeron dos modelos de celdas: 3 Celdas de cámara única y 3 de cámara doble, fabricadas en acrílico transparente con un volumen de 456 cm³. Se utilizaron electrodos de grafito (escobillas de motor) en el lado del ánodo, y láminas aluminio para el lado del cátodo, para el cierre del circuito y flujo de electrones, se utilizaron las Membranas de Intercambio Protónico – PEM compuestas de teflón – PTFE con poros de 0,5 µm. Se prepara vinaza sintética en laboratorio y se utiliza en diluciones al 10% v/v al 25% v/v y al 50% v/v para ser tratadas en las celdas CCM. Los valores de voltaje generados en los bioensayos realizados con duración de 66 horas, estuvieron en un rango entre los 0,2 a los 0,8 Voltios. En cuanto a resultados de eficiencia en tratabilidad, analizando los valores de DQO en mgL⁻¹, se alcanzaron valores de hasta un 73% de remoción (para el caso del ensayo con vinaza al 25%), todos los valores de DQO al final del proceso mostraron estar por debajo de lo exigido en la resolución 631 de 2015 del Ministerio del medio ambiente (que establece 900 mgL⁻¹ de DQO máx, para industrias tipo).

Palabras clave — Celdas de combustible microbianas, electrogénesis, inóculo, tratamiento vinazas.

Abstract — The vinasses, a residue of production of ethyl alcohol, highly contaminant, can be treated in systems based on anaerobic digestion. To degrade the organic matter contained in the vinasse, Microbial Fuel Cells – MFC can be used, and additionally obtain electrical energy. In this project, two cell models were designed and built: 3 single chamber cells and 3 double chamber, made of transparent acrylic with a volume of 456 cm³. Graphite electrodes (motor brushes) on the anode side, for the closure of the circuit and flow of electrons, the Proton exchange membranes – PEM were used, teflon compounds - PTFE with 0,5 µm pores. Synthetic vinasse is prepared in laboratory and it is used in dilutions at 10% v/v al 25% v/v y al 50% v/v to be treated in the cells MFC. The voltage values generated in the bioassays carried out with a duration of 66 hours, were in a range among the 0.2 to 0.8 Volts. Regarding efficiency results in treatability analyzing the COD values in mgL⁻¹, values of up to 73% removal were reached (in the case of the 25% vinasse test), all the COD values at the end of the process showed to be below that required in resolution 631 of 2015 of the Environment Ministry (which establishes 900 mgL⁻¹ of COD max, for related industries).

Keywords — Microbial fuel cells, electrogenesis, inoculum, vinasse treatment,

1 Ingeniero Ambiental, UNISANGIL.

2 Ingeniero de producción biotecnológica. Dr en Microbiología Agrícola UNESP. Docente Universidad del Bosque.

3 Ingeniero Sanitario y Ambiental, MSc en C. Recursos Energéticos.

I. INTRODUCCIÓN

En Colombia la destilación de alcohol representa un sector relevante para el desarrollo económico. Actualmente, se estima una producción diaria de 1.250.000 L de bioetanol [1], mientras que el sector de bebidas alcohólicas representa el 4% de la producción industrial a nivel nacional [2]. Sin embargo, cada litro de alcohol destilado genera entre 1 y 14 litros de vinaza, un co-producto que puede ser usado como fertilizante, aunque su aplicación o disposición incorrecta constituye un serio problema para el ambiente [3], debido principalmente a su alto contenido de materia orgánica. Alternativamente, con la finalidad de reducir su carga contaminante y aprovechar su potencial energético, la vinaza puede ser tratada en sistemas basados en la digestión anaerobia. Este proceso presenta algunas ventajas en comparación a sistemas aerobios, tales como la reducción y estabilización de los lodos generados y la tolerancia a la aplicación de altas cargas orgánicas [4]. Diverso número de estudios han enfocado su interés en recuperar energía a partir del tratamiento anaerobio de la vinaza, principalmente metano e hidrógeno. No obstante, poca atención se ha prestado sobre la posibilidad de obtener energía eléctrica de manera directa, a través del uso de las celdas de combustible microbianas, (Microbial Fuel Cell, MFC). Una MFC es un dispositivo que utiliza a los microorganismos electrogénicos para generar corriente eléctrica a partir de su metabolismo oxidativo, la cual se genera gracias a la capacidad de estos microorganismos de respirar adheridos a un electrodo polarizado [5], construido en materiales conductores (metales como el oro y materiales como el grafito). Proceso que es posible gracias a la participación de microorganismos electrogénicos, los cuales sirven como biocatalizadores para convertir un sustrato orgánico en electricidad a través de la entrega de electrones a un ánodo [6].

Las ventajas que tiene el utilizar las Celdas de Combustible Microbianas están entre otras, que pueden usarse en áreas remotas, con falta de infraestructura eléctrica; se puede utilizar con diversidad de combustibles, siendo consideradas para varias aplicaciones diferentes; puede reducir la producción de sólidos y lodos, reduciendo costos adicionales de manejo y tratamiento [7].

En el presente documento se relacionan los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el Laboratorio de Aguas de la Fundación Universitaria de San Gil UNISANGIL – Sede San Gil, del tratamiento de vinazas en Celdas de Combustible Microbianas – CCM (siglas en español). Para lograr tener control sobre las características del sustrato a tratar y lograr uniformidad en los ensayos realizados, se preparó vinaza sintética siguiendo parámetros de Godoi y otros, 2017. Por sus características, (pH, DQO, entre otras), se diluyó la vinaza para determinar en qué proporción en términos de volumen/volumen se lograba un mejor desempeño. Los ensayos de tratabilidad en las celdas

fueron realizados por triplicado durante períodos de cuatro días. Se utilizó un inóculo extraído del lodo de la rívera del Río Fonce para la operación del sistema bio-electroquímico. Durante los ensayos se tomaron valores de parámetros como pH, temperatura, conductividad y tensión (voltaje en V) y al inicio y final de cada ensayo, se midieron los valores de carga contaminante en términos de DQO.

II. METODOLOGIA

Se desarrolló una investigación de tipo experimental con diseño de experimento “estudio de caso con una sola medición”, pues Consiste en administrar un estímulo (se aplica un inóculo como estímulo para tratar la vinaza sintética), y después se aplican mediciones a una o más variables para observar que ha pasado con el grupo de interés (los bioensayos realizados en las celdas). Se adecuó un experimento que permitió el tratamiento de las vinazas mediante un sistema bioelectroquímico en celdas de combustible microbianas.

A. Fase 1. Diseño y construcción de celdas a implementar

Se elaboró el diseño de dos tipos o modelos de celdas: 3 Celdas de cámara única (Fig. 1) y 3 de cámara doble (Fig. 2). Elaboradas en Acrílico transparente con un volumen útil de 456 cm³, los electrodos utilizados y de fácil adquisición fueron: escobillas de grafito (ánodo), láminas aluminio (cátodo); la membrana de intercambio protónico PEM utilizada: Membrana de teflón – PTFE con poros de 0,5 μm, se escoge por su valor y fácil manipulación frente a las otras más utilizadas (membranas de NAFION). El diseño fue basado en diferentes configuraciones de diferentes autores y trabajos revisados, se escoge el acrílico como material de la celda, pues es un material traslucido y es fácil de manipular a la hora de construir la celda

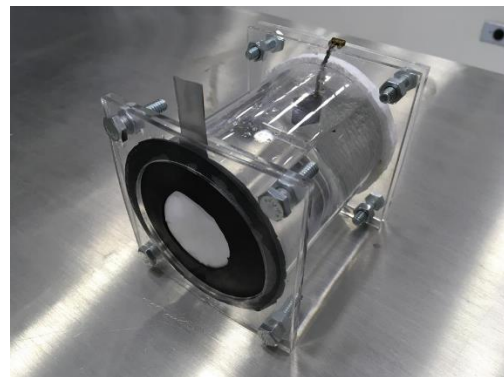


Fig. 1 Celda cámara única.

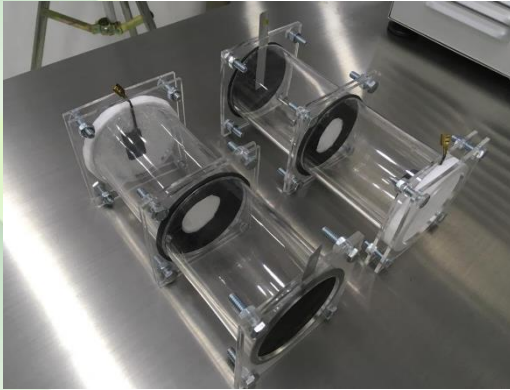


Fig. 2 Celda cámara doble

B. Preparación de vinaza sintética

Para tener condiciones relativamente estándar y homogéneas en los bioensayos a realizar, se prepara vinaza sintética, en una solución madre para vinaza de caña de azúcar, según lo establecido por los experimentos realizados por De Godoi y otros en el año 2017 [8].

C. Fase 2: Bioensayos

Los bioensayos fueron realizados por triplicado, se tomaron datos del voltaje generado en cada una de las celdas, con el fin de conocer el comportamiento bioelectroquímico en cuanto a generación de energía eléctrica, se utilizó Osciloscopio Fluke ScopeMeter® 190 II. Al inicio, en las primeras 6 horas se tomaron datos cada hora, y luego de las 6 horas, se tomaron datos cada 6 horas, en una duración de cada bioensayo de 66 horas.

Para la determinación de la eficiencia de remoción de carga contaminante, se tomaron los valores iniciales de carga contaminante de la vinaza sintética en términos de DQO en mgL^{-1} . Para cada bioensayo, al inicio se toma el valor de DQO de la dilución correspondiente y al final de cada bioensayo, se toman los valores finales de DQO.

Para verificar el comportamiento del sistema y observar el proceso, se toman valores diarios de pH y de Temperatura en $^{\circ}\text{C}$ con pH-metro PCE-PH 22.

D. Fase 3: Análisis de datos y resultados

Los datos de pH, Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) fueron graficados al igual que los datos de voltaje para su posterior análisis. A partir de los datos de voltaje obtenidos en cada una de los tratamientos realizados, se realizó un análisis estadístico con la finalidad de establecer cuales tratamientos presentaban diferencias estadísticamente significativas. Para ello, inicialmente fue verificada la normalidad de la distribución de los datos mediante el test de Shapiro-Wilk. Posteriormente, los datos se compararon utilizando el análisis de varianza unidireccional (ANOVA) seguido de la

prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5% ($p < 0,05$). Todos los análisis fueron realizados usando el software R (Versión 3.5.1).

III. MARCO TEÓRICO

A. Vinazas

Las vinazas, que representan los residuos en la producción de alcohol, contienen grandes concentraciones de materia orgánica y altas concentraciones de DQO ($40.000 - 70.000 \text{ mgL}^{-1}$) [9], han sido utilizadas para el acondicionamiento de suelos [10], producción de bio-diesel [11], preparación y uso de compost como abono [12], producción de gas metano [13], y obtención de materiales de construcción [14].

Éstos residuos orgánicos han sido tratados por varios procesos anaerobios en reactores UASB (de flujo ascendente con manto de lodos) [15], en reactores de lecho fluidizado inverso anaerobio [16], y en biorreactores discontinuos [17].

B. Bio-electrogenesis

Es un proceso en el cual se utilizan microorganismos para degradar materia orgánica y generar energía eléctrica [18]. Se ha logrado una mejor actividad de transferencia de electrones utilizando consorcios bacterianos presentes en lodos de fosa séptica anaeróbica y el estiércol de ganado vacuno como un inóculo [19].

C. Celdas de Combustible Microbianas – CCM

Son sistemas bio-electroquímicos que utilizan microorganismos para convertir la energía química que se encuentra en un sustrato en energía eléctrica. Estos sistemas han tenido diversas aplicaciones, generación de bioelectricidad microbiana con estiércol de ganado vacuno [18], tratamiento de frutas y verduras [19], aguas residuales industriales textiles [20], bio-remediación de sistemas contaminados con cromo y materia orgánica. [21], entre otros usos.

V. RESULTADOS

A. Vinaza sintética

Se logra obtener una vinaza sintética con un valor de DQO de 4380 mgL^{-1} , la cual fue diluida posteriormente para los bioensayos.

B. Resultados de los bioensayos realizados.

Los datos generados en los bioensayos fueron graficados (Fig. 3 y Fig. 4).

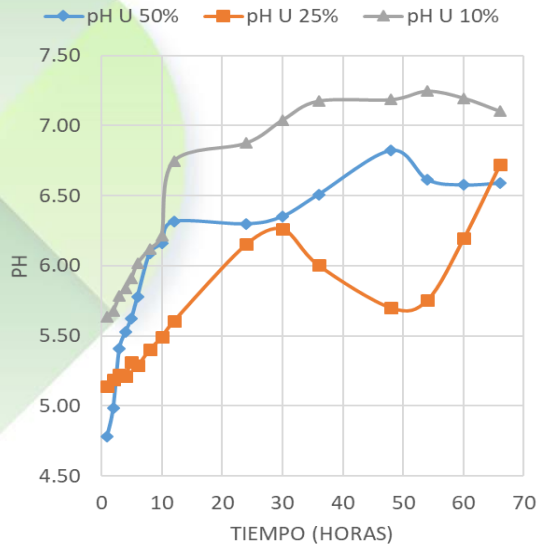


Fig. 3 Comportamiento del pH en los bioensayos realizados en celdas de cámara doble.

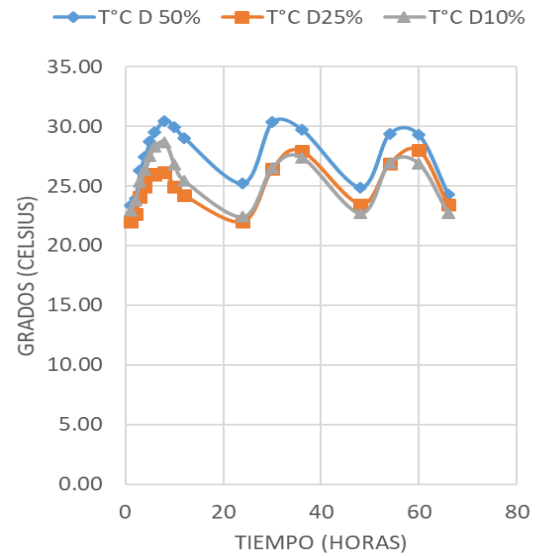


Fig. 5 Temperatura observada durante bioensayos en celdas de cámara doble.

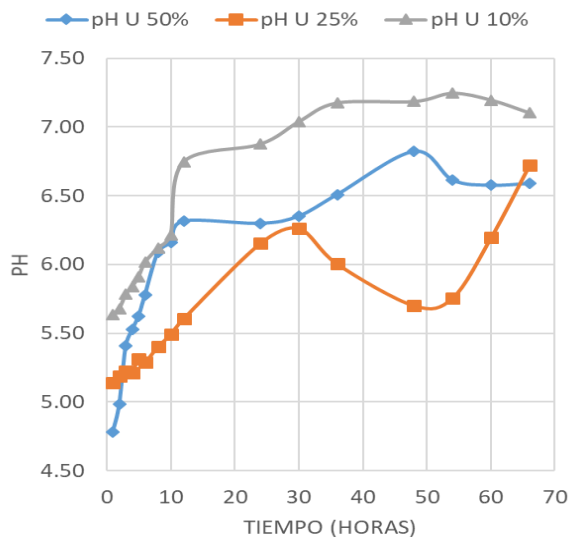


Fig. 4 Comportamiento del pH en los bioensayos realizados en celdas de cámara única.

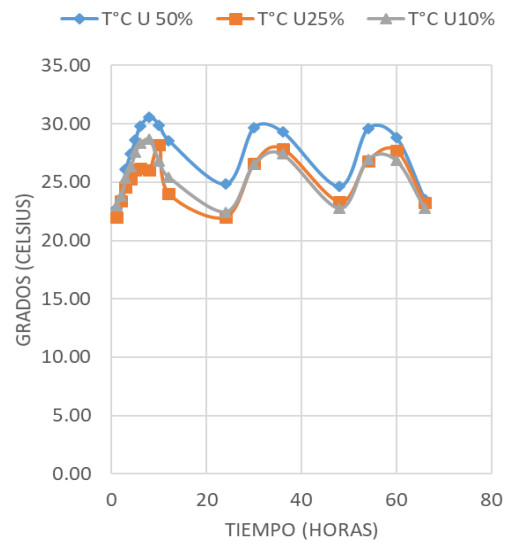


Fig. 6 Temperatura observada durante bioensayos en celdas de cámara única.

Se puede observar en las figuras anteriores un mínimo valor de pH al inicio (arranque) del bioensayo con vinaza diluida al 50% v/v. Tanto en la Figura 3 y la Figura 4, se observa un aumento del pH durante el tiempo transcurrido en los bioensayos, tendiendo el pH hacia un valor neutro (pH de 7).

La temperatura diaria osciló de acuerdo a la temperatura ambiental en el laboratorio, se puede observar en las gráficas que tanto en la Figura 5 y la Figura 6, la temperatura estuvo entre los 23 y los 30°C. Se observa también la variación en la temperatura que coincide con los ciclos día/noche.

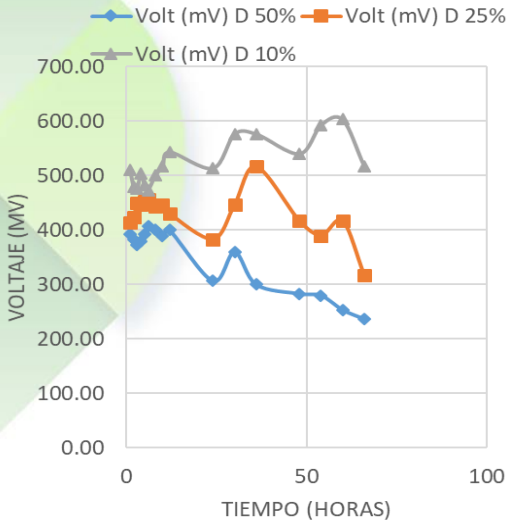


Fig. 7 Variación de Voltaje en mV en los bioensayos en celdas de cámara doble.

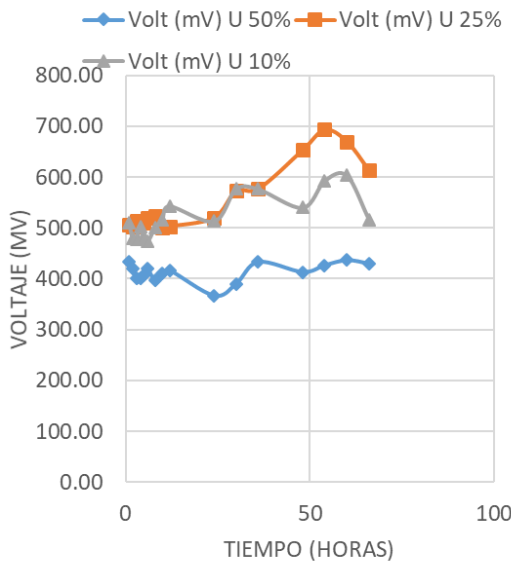


Fig. 8 Variación de Voltaje en mV en los bioensayos en celdas de cámara única.

En cuanto al voltaje, se evidenció un mejor desempeño en los ensayos con menor carga de vinaza (al 10% y al 25% relación v/v), en celdas de cámara única (Fig. 7 y Fig. 8). Estos tratamientos presentaron una variación estadísticamente significativa ($p < 0,05$) en comparación a los otros ensayos realizados con cámara doble (10-50%) y cámara única al 50% de vinaza. En consecuencia, los mayores valores se obtuvieron en cámara única con vinaza diluida al 25%, con un voltaje máximo promedio de 700 mV (Fig. 8).

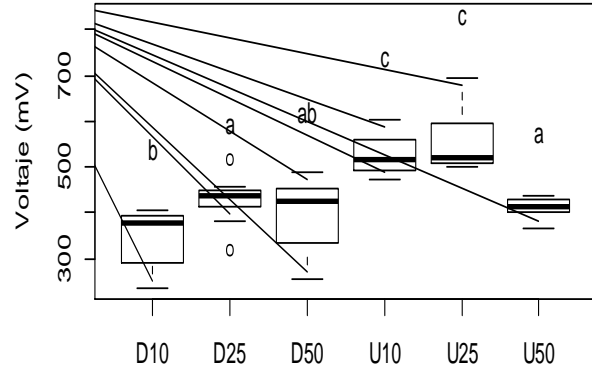


Fig. 9. Voltaje obtenido en los tratamientos realizados. D: Cámara doble; U: Cámara única. Los números indican la concentración de vinaza empleada al 10, 25 y 50%, respectivamente. Letras diferentes indican una variación significativa entre los tratamientos ($p < 0,05$).

Según el gráfico anterior (Fig. 9), los tratamientos con diferente letra varían significativamente ($p < 0,05$), analizando la media de los tratamientos y aplicando test de Tukey. El mayor voltaje fue obtenido en cámara única, siendo estadísticamente similares los tratamientos de 10% y de 25%. Mayores concentraciones de vinaza (50%) reducen la generación de electricidad.

C. Eficiencia de los tratamientos en las celdas CCM

Durante el proceso se alcanzaron valores de eficiencia en remoción de carga contaminante en términos de DQO de hasta un 73% para ensayo con vinaza al 25% (Fig. 10). Los valores de DQO al final de los bioensayos se encuentran por debajo de lo exigido en la resolución 631 de 2015 del Ministerio del Medio Ambiente (establece 900 mgL⁻¹ de DQO máximo para efluentes de industrias de bebidas alcohólicas y de producción de alcoholes).

DQO INICIAL mg O ₂ /L	Arranque Bioensayos DQO mg O ₂ /L	DQO final mg O ₂ /L	% de remoción n	Fijado por Res 631 de 2015 (DQO final)	
4380	Celda Única dil - 50%	1396	569,3	59,22	900 mg/L O ₂
	Celda Doble dil - 50%	1396	546,0	73,30	
	Celda Única dil - 25%	1386	446,0	67,82	
	Celda Doble dil - 25%	1386	469,3	71,91	
	Celda Única dil - 10%	236	66	72,03	
	Celda Doble dil - 10%	236	73,3	68,93	

Fig. 10. Valores de resultados reportados de DQO en los ensayos realizados.

IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Para la operación de celdas tipo CCM, el rendimiento debe evaluarse tanto desde el punto de vista de la producción de energía como de la depuración simultánea de las aguas residuales empleadas. Para ello se llevan a cabo medidas periódicas de voltaje y de demanda bioquímica de oxígeno DQO. A partir del voltaje se puede determinar la intensidad y la potencia en las pilas [22].

Se realizaron ensayos por triplicado con vinaza diluida al 50%, 25% y 10%; con una duración de 66 horas cada uno, obteniéndose mejores resultados en términos de voltaje V con vinaza diluida al 25% v/v (generándose valores entre 0,5V hasta 0,7V). En cuanto al tratamiento con otros efluentes en sistemas bio-electroquímicos, se pueden mencionar y comparar los resultados con otros trabajos realizados, es así que se obtuvieron valores relativamente estables de voltaje (0,2239 – 0,2284) realizando el tratamiento de lixiviados de la producción fermentativa de H₂ [23]. En otro trabajo, se alcanzaron valores de voltaje de 1,09 Voltios, utilizando efluentes de lavado de cacao tratados en celdas CCM [24], se utilizaron aguas residuales urbanas de El Camal, con concentraciones de DQO entre los 1980 y los 3200 mg/l, el tratamiento fue realizado en Celdas CCM, donde se obtuvieron valores de voltaje entre 500 y 530 mV, alcanzándose eficiencias en remoción de carga contaminante en términos de DQO del 93,9% a temperatura ambiente de 25°C.

Aunque en el presente trabajo se alcanzaron buenos voltajes para las celdas diseñadas e implementadas, los voltajes no presentaron un comportamiento estable y homogéneo. La variación de voltaje en el tiempo, puede estar relacionada con la actividad microbiana en el electrodo, donde actúan bacterias electrogénicas y también las que no son capaces de transferir electrones al ánodo, pero degradan la materia orgánica [25]. La combinación de poblaciones microbianas está relacionada con los productos que se generan en el medio durante la formación de la biopelícula lo que incide en la generación de voltaje, ya que los procesos sintróficos son claves en la electrogénesis de un sustrato [26].

A nivel general, se pudo establecer gracias a los bioensayos, una eficiencia en términos de remoción de carga contaminante mayor en las celdas de combustible de cámara doble, los valores de eficiencia máxima alcanzados estuvieron entre el 59,22% y el 73,30% en cuatro días que duraron los bioensayos.

La resolución 631 de 2015 del del Ministerio del Medio Ambiente, establece un valor del límite máximo permisible para descarga de aguas residuales para actividades relacionadas con la producción de azúcar y derivados a partir de la caña de azúcar (Vinazas) en 900 mgL⁻¹ de DQO. Los

valores finales obtenidos en este estudio se encuentran por debajo de lo exigido por la norma, con lo que se puede establecer que el tratamiento de la vinaza como residuo de la producción de alcohol etílico en Celdas de Combustible tipo CCM constituye una alternativa promisorias, posibilitando adicionalmente la generación simultánea de energía eléctrica.

V. CONCLUSIONES

El diseño empleado de las celdas de combustible microbianas presentó una buena configuración como sistema bio-electroquímico para degradar agua residual y producir energía eléctrica.

Se obtuvieron valores de remoción de la carga contaminante en términos de DQO (mgL⁻¹) asociada a la vinaza tratada en celdas de combustible microbianas entre el 59,22% y el 73,30%. Obteniéndose mejor remoción en las celdas de configuración de cámara doble en bioensayos con dilución de la vinaza al 50%.

Con respecto a generación de voltaje se logró con vinaza diluida al 25% v/v, una generación entre los 0,27 Voltios hasta los 0,8 Voltios, por lo que las celdas de combustible microbianas pueden ser una solución tecnológica al tratamiento de las vinazas y la generación de electricidad de manera directa como valor agregado.

Estadísticamente, los resultados fueron similares y no se presentó variación significativa en la producción de voltaje en los ensayos con la vinaza al 25% y al 10% en relación v/v, donde se obtuvieron los mayores valores de voltaje.

REFERENCIAS

- [1] Ibarra-Vega, D. W. (2016). Modeling waste management in a bioethanol supply chain: A system dynamics approach. *Dyna*, 83(195), 99-104.
- [2] Zapata, Juan G., y otros. Una estimación de la adulteración y la falsificación de bebidas alcohólicas en Colombia. 2012.
- [3] Ocampo, Aquiles. Alcohol carburante: actualidad tecnológica. *Revista EIA*, ISSN 1794-1237 Número 1, p. 39-46. Febrero 2004.
- [4] Borjas, H. Zulema. Biodegradación electrogénica de acetato en pilas de combustible microbianas. Proyecto de fin de master. Universidad de Alcalá. 2012.
- [5] Lovley, D.R. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Appl. Environ. Microbiol.* 69, 1548-55 (2003). (4 y 9 y 29).
- [6] Falcón, A., Lozano, J. E., & Juárez, K. Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Apdo. Postal 510-3 Cuernavaca, Mor, 62250, México.TFT," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 20, pp. 569-571, nov. 1999.
- [7] Pandey, Prashant, et al. "Recent advances in the use of different substrates in microbial fuel cells toward wastewater treatment and simultaneous energy recovery." *Applied Energy* 168 (2016): 706-723.
- [8] de Godoi, L. A. G., Foresti, E., & Damianovic, M. H. R. Z. (2017). Down-flow fixed-structured bed reactor: An innovative reactor configuration applied to acid mine drainage treatment and metal recovery. *Journal of environmental management*, 197, 597-604.

- [9] Guerrero, I. Q. (2011). Perception and attitude of sugar cane growers concerning the filter cake compost and vinass. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(3).
- [10] Cabrera Díaz, A., & Díaz Marrero, M. Á. (2013). Tratamiento de vinaza cubana en un reactor anaerobio empacado de flujo ascendente. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(2), 41-49.
- [11] Muñoz, M., C. (2016). Potential energy vinaza for use as fuel, (October 2015).
- [12] Quiroz Guerrero, I., Pérez Vázquez, A., Landeros Sánchez, C., Morales Ramos, V., & Zetina Lezama, R. (2011). Perception and attitude of sugar cane producers on the compost of cachaça and vinasse. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(3), 847–856. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000300014
- [13] Guevara, C. A., Arenas, H. A., Mejía, A., & Peláez, C. A. (2012). Obtención de etanol y biogás a partir de banano de rechazo. *Informacion Tecnologica*, 23(2), 19–30. <http://doi.org/10.4067/S0718-07642012000200004>
- [14] Cristina, L., & Mogollón, B. (2016). Residuos agrícolas de caña de azúcar como material alternativo en elementos constructivos. Caso de estudio: Pabellón de usos múltiples Santa.
- [15] Ambiente, U. Y. M. (2013). Cinthya Alejandra Sosa Villalobos
- [16] Houbron, E., Sandoval Rojas, M. E., & Hernández Muñoz, A. F. (2016). Tratamiento de vinazas en un reactor de lecho fluidizado inverso anaerobio. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 32(3), 255–266. <http://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.03.01>
- [17] Fallis, A. (2013). Evaluación de la disminución de la carga contaminante de la vinaza de destilería por tratamiento anaerobio. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- [18] Figueredo, F., Olaya, A., & Cortón, E. (2014). Celdas de combustible biológicas basadas en el metabolismo fotosintético. *Química Viva*, 13(3).
- [19] Ríos, S. (2016). "Generación de bioelectricidad microbiana con estiércol de ganado vacuno, mediante celdas de combustible microbiano, Estación Experimental Tunshi Espoch." Retrieved from <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/5662/1/236T0214.pdf>
- [20] Armas Chugcho Patricia A y Ramírez Yambombo Geovany G. (2014). "Generación De Electricidad Microbiana Con Diferentes Matrices Orgánicas Mediante Celdas De Combustibles," 105.
- [21] Jimenez, E. B. T. (2017). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, 123. Retrieved from <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/6500/1/88T00212.pdf>
- [22] Hernández Fernández, Francisco José, et al. Montaje y estudio de una pila de combustible microbiana para la producción de electricidad con depuración simultánea de aguas residuales. 2010.
- [23] Carmona-Martínez, A. A. "Obtención de energía eléctrica directa de una celda de combustible microbiana mediante el tratamiento de lixiviados de la producción fermentativa de H₂." México, D, F (2008).
- [24] Valencia Pacho, Marleni Yovanna. "Evaluación de generación de electricidad y remoción de materia orgánica en celdas de combustible microbiana en aguas residuales de camal." (2018).
- [25] Song, Tian-shun, Xia-yuan Wu, and Charles C. Zhou. "Effect of different acclimation methods on the performance of microbial fuel cells using phenol as substrate." *Bioprocess and biosystems engineering* 37.2 (2014): 133-138.
- [26] Kiely, Patrick D., John M. Regan, and Bruce E. Logan. "The electric picnic: synergistic requirements for exoelectrogenic microbial communities." *Current opinion in biotechnology* 22.3 (2011): 378-385.