

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y GENERACIÓN SIMULTÁNEA DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS.

WASTEWATER TREATMENT AND SIMULTANEOUS GENERATION OF ELECTRICITY BY MICROBIAL FUEL CELL.

Néstor Ariel Algecira Enciso¹ Carlos Fernando Hernández Prada² Rodrigo Antonio Ibáñez Sierra³

RESUMEN: Las celdas de combustible microbianas son dispositivos que permiten captar la energía eléctrica derivada del proceso de oxidación y reducción que realizan cierto tipo de bacterias sobre la materia orgánica contenida en el agua residual. Este proceso que se realiza en condiciones anaeróbicas, se constituye en una etapa de tratamiento biológico de aguas de residuales que ayuda a disminuir su contaminación.

En ésta investigación se construyeron de manera secuencial varios prototipos de celdas de combustible microbianas empleando diferentes materiales y dimensiones; el trabajo se desarrolló en cuatro fases de experimentación donde manteniendo constantes las condiciones del agua residual, se analizaron los comportamientos de voltaje, corriente y potencia en el tiempo, se analizaron también los cambios de estas variables en función de las dimensiones de los electrodos, además se utilizaron diferentes fuentes de flora bacteriana como lodos de río y excrementos de animales como cerdos, gallinas, vacas y caballos.

Para mediciones de las variables se construyó un sistema de adquisición de datos conectado a un computador que los almacena por medio de un software desarrollado para el proyecto. De éste modo, las modificaciones hechas en cada fase de experimentación permitieron un proceso de mejoramiento continuo del dispositivo ya que en la cuarta fase se logró disminuir la resistencia interna y así obtener voltajes más altos que en la primera fase, también se demostró por medio de pruebas DBO5 y DQO la reducción de la carga orgánica del agua con respecto a sus condiciones iniciales.

ABSTRACT: Microbial fuel cells are devices that can capture electric power resulting from the process of metabolism of certain types of bacteria on organic matter in the wastewater. This process performed under anaerobic conditions, represents a stage of biological treatment of sewage water that helps to reduce pollution.

In this research, several prototypes of microbial fuel cells were built sequentially using different material and dimensions. The work was developed in four phases at constant experimental conditions of the wastewater. The behavior of voltage, current and power in time and the changes of these variables depending on the size of the electrodes were analyzed. Different sources of bacterial flora from river mud and feces of animals such as pigs, chickens, cows and horses were also used.

In order to measure the variables, we built a data acquisition system connected to a computer that stored these data using a software developed for the project. Thereby, any changes made in each phase of testing allowed a continuous improvement process of the device. In the four phase, the internal resistance decreased, making it possible to obtain higher voltages than those in the first phase. A reduction of the organic load of water with respect to the initial conditions was shown by tests BOD5 and COD.

PALABRAS CLAVE: *Celdas de combustible microbianas, bacterias, energía eléctrica, condiciones anaeróbicas, demanda química y bioquímica de oxígeno.*

KEY WORDS: *Microbial fuel cells, bacteria, power energy, anaerobic conditions, chemical and biochemical oxygen demand.*

¹ Ingeniero Químico universidad Nacional de Colombia

² Ingeniero Electrónico Universidad Nacional de Colombia

³ Estudiante Ingeniería Eléctrica Universidad Nacional de Colombia

nalgecira@unal.edu.co

cfhernandezp@unal.edu.co

raibanezs@unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día no se puede hablar de energía sin tener en cuenta al medio ambiente, según el IPCC⁴ por más de un 90% de probabilidad, la influencia antropogénica ha generado variaciones en el clima del planeta, esto debido principalmente al uso excesivo del petróleo y sus derivados como fuente de energía, al igual que la quema de carbón a nivel mundial y principalmente en las industrias, lo cual ha incrementado las emisiones de gases de efecto invernadero.

El informe Stern sobre la economía del cambio climático pronostica problemas macroeconómicos para los próximos años si el hombre no toma las decisiones adecuadas para afrontar esta problemática, de esta manera desde el punto de vista económico el calentamiento global es una oportunidad para generar nuevos sistemas de generación de energía y uso eficiente de la misma, para además de mitigar, reducir los costos derivados del uso de la energía en sectores como la industria y los hogares.

Las fuentes de energía renovables se están convirtiendo hoy en día en medidas para mitigar el cambio climático, así como una solución a problemas de suministro de energía a poblaciones con un escaso suministro y como ahorro económico en los bolsillos de muchos empresarios.

Las celdas de combustible microbianas han generado gran interés a nivel internacional no solo por tratarse de una fuente de energía renovable sino también por la ventaja de poder tratar aguas residuales simultáneamente al proceso de generación de energía. Típicamente una celda de combustible microbiana se encuentra compuesta por dos cámaras separadas por una membrana de intercambio protónico, y un circuito eléctrico conformado por dos electrodos, conductor eléctrico y una carga resistiva. Figura 1⁵.

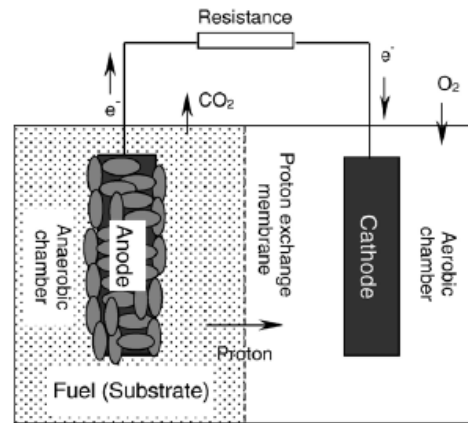


Fig. 1. Esquema básico de una celda de combustible Microbiana.

Una de las cámaras contiene el ánodo por lo cual es llamada cámara anódica o cámara anaerobia y es en esta donde se almacena el agua residual y la fuente de microorganismos a ser empleados para el tratamiento biológico y la generación de energía eléctrica. Por lo general estos microbios son de carácter anaerobio razón por la cual la cámara anódica debe operar sin la presencia de oxígeno en su interior ya que la presencia de este gas hace que se pierda eficiencia en la operación del sistema [1]. La segunda cámara contiene el cátodo, y es en donde se recolecta el agua que se forma luego del proceso.

La interfaz de los dos compartimientos consiste en un material especial que permite solo el paso de iones positivos de hidrógeno rechazando cualquier otra partícula, aunque se puede emplear un puente de sal para realizar esta función esto incrementa la resistencia interna del sistema y permite el paso de partículas no deseadas disminuyendo la eficiencia de la celda [2,3].

El material y el área de los electrodos también influye en el rendimiento de las celdas de combustible microbiano ya que los microorganismos usados tienen la capacidad de ceder electrones a materiales rocosos, las características conductivas del grafito lo hacen un material ideal para aprovechar las cargas obtenidas del proceso de metabolización de la materia orgánica que hacen las bacterias, además según investigaciones anteriores [4,5] incrementar el área de los electrodos expuesta a las bacterias hace que se aumente la densidad de corriente y de potencia generados, además pueden compensar las pérdidas por muerte y espacio ocupado por otras bacterias no generadoras de electricidad en la bio-película [6].

⁴ Intergovernmental Panel On Climate Change

⁵ Tomada de: Zhuwei Du. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. Science Direct [base de datos en línea] 13p disponible en: <http://www.sinab.unal.edu.co/contenido/recursos/bases.php?var=s>

Debido a todas estas condiciones, las celdas de combustible microbianas de dos cámaras pueden ser construidas de diversas formas e incluso se han construido celdas de combustible de una sola cámara con el objetivo de aumentar el rendimiento y efectividad del sistema [3,4].

En esta investigación se diseñaron celdas de combustible microbianas de doble cámara y se utilizaron lodos de río y excrementos de animales de finca como gallinaza, porquinaza y boñiga como fuente de microorganismos y se estandarizó el agua residual doméstica en el laboratorio.

Los resultados obtenidos demuestran el funcionamiento de las celdas de combustible microbianas y muestran un futuro promisorio en la autosuficiencia energética de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Se realizaron 4 fases de experimentación las cuales condujeron a la construcción de un prototipo escalado y con características mejoradas con respecto a cada una de las anteriores fases.

Para la primera fase de experimentación se construyó un prototipo el cual contó con dos cámaras con volumen de un litro unidas a través de un puente de sal que actúa como membrana de intercambio protónico, y un circuito eléctrico conformado por dos electrodos de grafito 19 mm de ancho por 22 mm de altura para un área aproximada de 0.836×10^{-3} [m²], resistencias electrónicas y un conductor de cobre de calibre 12 AWG.

La fabricación, pruebas de funcionamiento y puesta en marcha se llevaron a cabo en los laboratorios de ingeniería eléctrica y en los laboratorios de ingeniería química (LIQ) de la universidad nacional de Colombia.

Se preparó agua residual sintética para estandarizar las primeras 3 fases de experimentación la cual fue compuesta de: Na₂HCO₃ (Bicarbonato de Sodio) 120,2mg/l, Na₂HPO₄ (Fosfato ácido de sodio) 3,35mg/l, FeCl₃·6H₂O (Tricloruro de hierro hexahidratado) 4,25 mg/l, KCl (Cloruro de potasio) 3,25mg/l, MgSO₄·7H₂O (sulfato de magnesio heptahidratado) 2,4mg/l, Urea 24,5mg/l, Celulosa 3,05mg/l, Jabón en polvo 2,35mg/l, Gelatina sin sabor 47,85mg/l, Almidón 240,15mg/l, Leche en Polvo 143,85mg/l.

En la primera fase se agregaron 44,1g de porquinaza a la cámara anaerobia junto con 0,8l de agua residual sintética, el medio de intercambio protónico fue compuesto de 8g gelatina sin sabor disuelta en 100ml de agua y 2g de sal. En la cámara aerobia se agregó 0,55 l de agua destilada y se ingresó aire a 0,2 bares de presión.

La primera fase de experimentación duró 12 días tiempo durante el cual se realizaron mediciones de voltaje con el multímetro digital Fluke 12 sobre varios valores de resistencias a la salida de la celda (entre 500Ω Y 1,3MΩ). Los parámetros de corriente y potencia se hallaron mediante la ley de ohm $V=I \cdot R$.

Se empleó un agitador magnético en la cámara anaerobia con el fin de promover una mezcla homogénea, también se realizó un orificio en dicha cámara para escape de gases producto de la actividad bacteriana.

Para la segunda fase de experimentación se construyeron 3 prototipos adicionales, idénticos al primero, para un total de 4 prototipos, en la cámara anaerobia de cada prototipo se agregaron 0,8l de agua residual sintética, para la celda 1 se agregó 358g de porquinaza, para la celda 2 380g de gallinaza, para la celda 3 363g de boñiga y para la celda 4 360g de lodos de río. Se cambió el puente salino por agar como medio de intercambio protónico con una concentración de 100g/l de agua. En la cámara aerobia se mantuvieron las mismas condiciones que en la fase 1.



Fig 2. Prototipos usados para la primera y segunda fase de experimentación.

El siguiente paso en la investigación (fase 3) consistió en el desarrollo de un prototipo de celda de combustible mediano mejorado incluyendo el aumento del volumen (5l por cada cámara), el aumento en el área de los electrodos (200 cm²), el mejoramiento del acople entre las cámaras, la utilización de difusores de oxígeno en la cámara aeróbica, la activación química de la membrana Nafion 117 Cs H⁺, la previa limpieza

de los electrodos [7] en una solución de Hidróxido de sodio (NaOH) a una concentración de 1M y posteriormente en una solución de ácido clorhídrico (HCl) a una concentración de 1M, la utilización de un tanque de reservorio para agua residual, la utilización de 200g de boñiga como fuente bacteriana en la cámara anaerobia, la implantación un sistema de monitoreo para realizar pruebas previo a la construcción del prototipo final, este sistema está conformado por una tarjeta de adquisición de datos y una interfaz gráfica para recepción , almacenamiento y gráfica de la variables de interés.



Fig 3. Prototipo usado en la tercera fase de experimentación

La tarjeta de adquisición de datos fue realizada con un microcontrolador de la empresa Microchip y se tomaron datos por medio del sensor de temperatura-humedad SHT71 y el sensor de temperatura TMP100 de Texas Instruments y se midió la tensión de salida de las celdas amplificando dicha señal previamente con el amplificador de instrumentación AD620 y digitalizándola mediante el conversor analógico digital de 10 bits del micro controlador, también se realizaron pruebas con el conversor analógico digital ADS1110 de 16bits de Texas instruments. Para la tercera y cuarta fase de experimentación también se utilizó el multímetro Fluke 116, para mediciones de voltaje y corriente.

La comunicación se realizó mediante el protocolo RS232 y se implementó una interfaz gráfica en java, para recibir y almacenar los datos para su posterior análisis.

Se tomaron mediciones de forma automática cada hora, de tensión en bornes de la celda, temperatura y humedad del ambiente y temperatura en la cámara anaerobia de la celda de combustible.

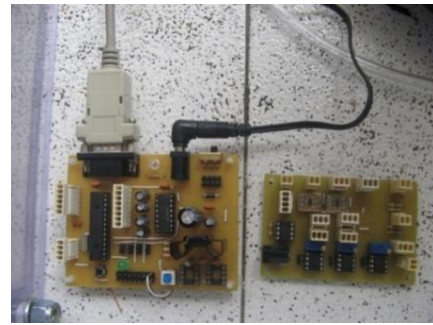


Fig 4. Tarjetas de adquisición de datos.

Con la información recogida en las etapas previas se procedió a construir el prototipo final que constituyo la fase 4, compuesto por un reactor con agitación mecánica de 40cm de alto, 30cm de ancho y 28cm de profundidad y un clarificador de 93 cm de alto y 12cm de diámetro, el volumen de la cámara anaerobia fue 11,5 litros, el de la cámara aerobia 8,5l y el clarificador de 7l, un aireador y el sistema de adquisición de datos previamente diseñado, los electrodos usados tienen un área efectiva de 800cm², el acople entre las cámaras fue mejorado para evitar fugas de agua y reducir la distancia entre los electrodos, se utilizó la membrana Nafion 117 Cs H⁺ previamente activada, para facilitar el paso de los iones de hidrógeno a la cámara aerobia.

Se utilizaron 2000g de boñiga en la cámara anaerobia como fuente bacteriana y fueron acondicionados al agua residual sintética durante 20 días, previo al inicio de la toma de datos.

De igual forma se aumentó la carga orgánica del agua residual sintética, tanto por adición de nuevos componentes, como por aumento en las cantidades de los compuestos empleados en la fórmula anterior.

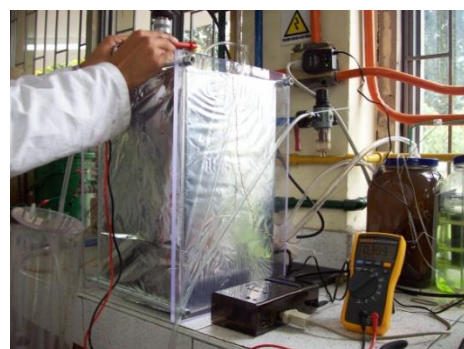


Fig 5. Prototipo usado en la cuarta fase de experimentación.

En la nueva fórmula del agua residual sintética se adicionó acetato de sodio, el cual constituye una fuente de carbono inmediata por su fácil

degradación en comparación con el almidón. Adicionalmente, se agregaron otras sales, que, aparte de servir como nutrientes a la colonia bacteriana son empleadas como reguladores del pH. La composición del agua sintética residual implementada durante la última fase fue adaptada de [8].

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En las dos primeras fases se tomaron datos diarios de tensión con diferentes resistencias con el fin de observar el comportamiento de la celda de combustible microbiana como fuente eléctrica, los resultados obtenidos mostraron que la resistencia interna de los primeros prototipos es elevada y por lo tanto la potencia y la corriente obtenidas son muy bajas, además, se observó que los medios de intercambio protónico alternativos no fueron eficientes ya que dejaron el paso de partículas de una cámara a otra, lo que produjo que las celdas iniciales no tuvieran el comportamiento deseado ya que el agua subproducto en la cámara aerobia fue contaminada.

Con estos resultados se realizaron los cambios propuestos en la celda y se determinó que es posible reducir la resistencia interna y así aumentar la corriente y la potencia generadas, realizando modificaciones en la estructura de la celda. En la tabla I se muestran los resultados obtenidos en todas las fases de experimentación en cuanto a variables eléctricas.

Con el prototipo mejorado de la fase tres se redujo aún más la resistencia interna, se obtuvieron voltajes más constantes durante el tiempo de proceso y gracias a la mayor superficie de electrodo se alcanzaron mayores densidades de potencia y de corriente.

TABLA I

Fase	Inóculo	V _{máx} [mv]	I _{máx} [mA]	P _{máx} [mW]	R _{int} [Ω]
1	Porquinaza	315	0,018	0,00123	10000
2	Porquinaza	426	0,029	0,00288	12000
	Gallinaza	717	0,014	0,00234	51000
	Boñiga	326	0,011	0,0011	12000
	Lodo	310	0,014	0,00093	12000
3	Boñiga	476	0,0705	0,0127	900
4	Boñiga	449	1,8	0,363	111,76

Con relación al tratamiento de aguas residuales, se midieron los parámetros de DQO Y DBO₅ para evaluar la remoción de materia orgánica durante el tratamiento. En las fases iniciales de

experimentación se presentaron problemas relacionados con la toma de muestras, por lo que los resultados obtenidos no fueron satisfactorios. Se observó que durante la tercera fase experimental se obtuvieron eficiencias de remoción del 33% respecto al parámetro DQO, y 18.7% respecto al parámetro de DBO₅. Estos valores confirman que, efectivamente se realizó un tratamiento al agua residual.

En la cuarta etapa de investigación se tomaron mediciones de Voltaje con un resistor de 100Ω a la salida de la celda durante 5 días, se puede notar que la tensión fue incrementando con el pasar de los días, esto implicaría un incremento en la población de microorganismos a medida que pasa el tiempo.

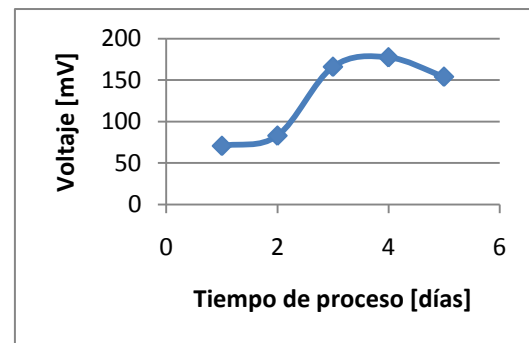


Fig 6. Gráfica de voltaje contra tiempo

La corriente al igual que la tensión con R=100Ω tuvo un comportamiento de incremento durante el periodo de medición.

En la figura 7 se puede observar la corriente medida directamente sobre el valor de resistencia de 100Ω.

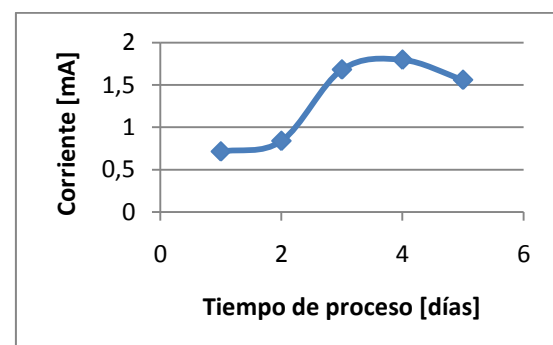


Fig 7. Gráfica de corriente contra tiempo.

Potencia generada. Como es de esperar la potencia generada por la celda tiene un comportamiento creciente durante el periodo de medición como se puede observar en la figura 8.

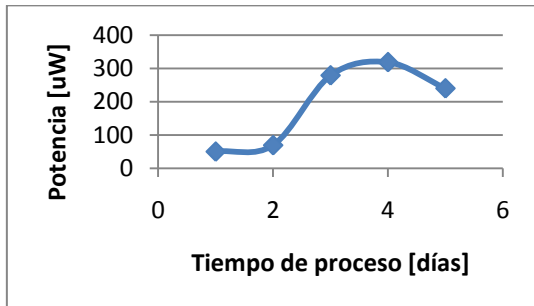


Fig 8. Gráfica de potencia contra tiempo.

En la figura 9 se puede observar la densidad de potencia en función de la densidad de corriente, se puede ver que para una densidad de corriente de $22,45\text{mA}\cdot\text{m}^{-2}$ se tiene el máximo valor de densidad de potencia. Si cruza el valor de la resistencia a esa densidad de corriente y potencia se puede obtener de forma rápida el valor aproximado de la resistencia interna de la celda (Valor al cual se produce la máxima transferencia de potencia), la cual sería 100Ω aproximadamente, más adelante se hallara este valor mediante la curva de polarización.

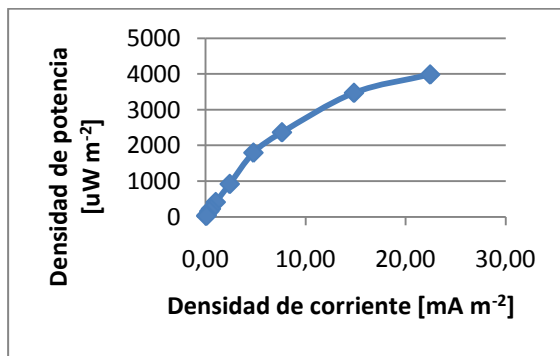


Fig 9. Gráfica de corriente contra tiempo.

Curva de Polarización. La resistencia interna de la celda es uno de los parámetros importantes para mejorar su eficiencia. En la figura 10 se tiene la curva de polarización, su pendiente en la zona lineal sería la resistencia interna.

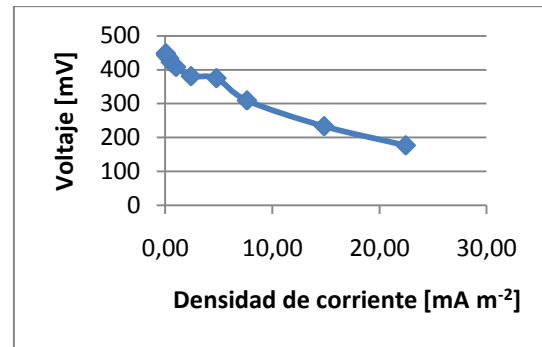


Fig 10. Curva de polarización.

Se tomó la curva de polarización del día 4 debido a que se obtuvo la menor resistencia interna.

La curva es aproximadamente lineal entre los puntos:

$$P_1 = (7,63\text{mA} \cdot \text{m}^{-2}, 309,8\text{mV})$$

$$P_2 = (22,45\text{mA} \cdot \text{m}^{-2}, 177,3\text{mV})$$

La resistencia interna se define como:

$$R_{int} = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

$$= \frac{177,3\text{mV} - 309,8\text{mV}}{7,63\text{mA} \cdot \text{m}^{-2} - 22,45\text{mA} \cdot \text{m}^{-2}} \cdot \left(\frac{1}{0,08\text{m}^2}\right)$$

$$= 111,76\Omega$$

De acuerdo a esto es evidente que la mejora del acople para reducir la distancia entre los electrodos disminuyó la resistencia interna de la celda por un orden de 10 veces comparado con las resistencia interna del prototipo mediano, de igual manera se puede ver que la resistencia interna hallada por medio de la curva de polarización se aproxima bastante al valor hallado de acuerdo a la figura 10.

La máxima potencia generada por la celda en función del voltaje de circuito abierto (OCV) es:

$$P_{\max\text{ocv}} = \frac{OCV^2 R_{ext}}{(R_{int} + R_{ext})^2}$$

Para $R_{ext} = R_{int}$ obtendríamos la máxima transferencia de potencia de acuerdo a la teoría de circuitos eléctricos [9,10], por tanto:

$$p_{\max} = \frac{OCV^2 R_{int}}{(2R_{int})^2}$$

$$= \frac{0,448,9\text{V}^2 \cdot 111,76\Omega}{(2 \cdot 111,76\Omega)^2} = 363,66\mu\text{W}$$

Para ver el efecto del área del ánodo se calcula la densidad de potencia máxima:

$$p_{\max \text{ ánodo}} = \frac{363,66 \mu W}{0,08 m^2} = 4.54 mW/m^2$$

Otro factor de gran importancia es la producción de potencia basado en el volumen total del reactor, la convención en ingeniería ambiental es usar el volumen total del reactor [11].

$$p_{\max \text{ reactor}} = \frac{363,66 \mu W}{0,02 m^3} = 18.18 mW/m^3$$

Se calcula también la máxima densidad de corriente:

$$I_{\text{ánodo}} = \frac{\sqrt{P_{\max}}}{A_{\text{ánodo}}}$$

$$I_{\text{ánodo}} = \frac{\sqrt{\frac{363,66 \mu W}{111,76 \Omega}}}{0,08 m^2} = 22,5 mA/m^2$$

En comparación con los primeros prototipos de laboratorio en donde se obtuvo una corriente máxima de $18 \mu A$, con el prototipo final se obtuvo $1,8 mA$ lo que significa un incremento de 100 veces los valores iniciales obtenidos de corriente.

Con el prototipo final se logró una resistencia interna de $111,76 \Omega$ valor importante si se tiene en cuenta que en la primera fase las resistencias internas de los prototipos fueron del orden de los 10.000Ω .

La disminución de la resistencia interna de la celda significa un aumento en la potencia que puede suministrar el sistema y un voltaje de salida más estable.

Se realizaron pruebas de DBO_5 para el agua residual sintética y el agua tratada, la DBO_5 del agua residual sintética fue de $363 mg/l-O_2$ y el del agua tratada fue $111 mg/l-O_2$ para una eficiencia de remoción de materia orgánica del $69,4\%$.

4. CONCLUSIONES

Se comprobó que en el estiércol de animales como cerdos, gallinas y vacas y en lodos de ríos existe la presencia de microorganismos que al

degradar la materia orgánica presente en el agua residual permiten obtener corrientes eléctricas pequeñas. En las primeras fases de la investigación se obtuvieron corrientes del orden de microamperios, los prototipos presentaron elevados valores de resistencias internas del orden de $10 k\Omega$ y $51 k\Omega$, lo cual representó pérdidas de voltaje en la celda, con el prototipo de la fase 3 se redujo la resistencia interna a 900Ω lo cual redujo las pérdidas y aumento la capacidad de la celda para entregar potencia, con el prototipo de la fase 4 se obtuvieron los mejores resultados eléctricos, la resistencia interna se redujo a $111,76 \Omega$ y la máxima corriente entregada por la celda fue de $1,8 mA$, lo cual fue un incremento considerable de acuerdo a los resultados obtenidos en las anteriores fases. La disminución de la resistencia interna fue el resultado de hacer modificaciones en la estructura de la celda como disminuir la distancia entre los electrodos, aumentar el área de la membrana y de los electrodos proporcionalmente.

De acuerdo a los ensayos de laboratorio se verificó que es posible disminuir la carga orgánica presente en el agua residual utilizando celdas de combustible microbianas, lo cual permitiría realizar un tratamiento biológico a aguas contaminadas previo a su vertimiento en los distintos cuerpos de agua. Las eficiencias obtenidas de remoción de materia orgánica en las fases 3 y 4 muestran que el tratamiento biológico es apenas una de las etapas para obtener un tratamiento de aguas residuales óptimo.

Las celdas de combustible microbianas se proyectan a futuro como una opción a implementar en plantas de tratamiento de aguas residuales con la ventaja de generar energía eléctrica que podría abastecer parte de las necesidades energéticas de la misma planta.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la División de Extensión Sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia con la tercera convocatoria Sinergia, agradecemos toda su colaboración y soporte prestado durante la ejecución del proyecto. Agradecemos a los estudiantes Rubén López de Ingeniería Eléctrica y Nathalia Arbeláez de Ingeniería Química por su colaboración durante la ejecución del proyecto.

6. REFERENCIAS

- [1] M.A. Rodrigo , P. Cañizares. Production of electricity from the treatment of urban wastewater using a microbial fuel cell. Science Direct [base de datos en línea] 9p. Disponible en: <http://www.sinab.unal.edu.co/contenido/recursos/bases.php?var=s>
- [2] Booki Min. Shaoan Cheng. Bruce E. Logan. Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. Science Direct [base de datos en línea] 12p. Disponible en: <http://www.sinab.unal.edu.co/contenido/recursos/bases.php?var=s>
- [3] Zhuwei Du. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. Science Direct [base de datos en línea] 13p disponible en: <http://www.sinab.unal.edu.co/contenido/recursos/bases.php?var=s>
- [4] Di Lorenzo Mirella Keith Scott, Tom P. Curtis , Ian M. Head. Effect of increasing anode surface area on the performance of a single chamber microbial fuel cell , Science Direct [base de datos en línea] 9p. Disponible en: <http://www.sinab.unal.edu.co/contenido/recursos/bases.php?var=s>
- [5] Galindo J: Estudio de una celda de combustible orgánico utilizada para la generación de energía eléctrica en procesos de tratamiento biológico de aguas residuales. Bogotá D.C. 2005. 72 p. Trabajo de grado (magister en ingeniería civil). Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería civil y ambiental.
- [6] Alzate-Gaviria, Liliana. Fuentes-Albarrán, Carmen. Álvarez-Gallegos, Alberto. Alvarez-Gallego, Alejandro. Sebastian, P. J.. Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo pem: Interciencia [en línea] 2008, vol. 33 no. 007 [citado 2010-05-26]. Disponible en Internet: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=33933706>. ISSN 0378-1844
- [7] Lovley, Derek y Chaudhuri, Swades. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cell. Nature Biotechnology, vol 21No. 10, p 1229-1232, octubre2003 disponible en: <http://www.geobacter.org/publications>
- [8] Cha Jaehwan, Choi Soojun, Yu Hana, Kim Hyosso & Kim Changwon. Directly Applicable Microbial Fuel Cells in Aeration tank for wastewater treatment. Science Direct [base de datos en línea] 8p. Disponible en: <http://www.sinab.unal.edu.co/contenido/recursos/bases.php?var=s>
- [9] Hayt W, Kemmerly: Análisis de circuitos en ingeniería. Sexta edición. Mc Graw. Hill 2003.
- [10] Dorf Svoboda circuitos eléctricos 5 edición alfaomega 2003 pag 177
- [11] Logan Bruce E. Microbial Fuel Cell. Pennsylvania. Wiley Interciencia 2007. 200p.