

Generación de energía eléctrica mediante un fotobiorreactor con microalgas “*Chlorella sp.*”

Generation of electrical energy by means of a photobioreactor with microalgae "Chlorella sp."

Rojas-Flores S.¹, M. De La Cruz Noriega², Cabanillas-Chirinos L.², Carranza-Vigo C.³, Quiroz De La Cruz J.³, Zavaleta Portilla S.³, Angelats-Silva L.⁴

¹Grupo de Investigación en Ciencias Aplicadas y Nuevas Tecnologías, Universidad Privada del Norte, Trujillo, 13007, Peru. segundo.rojas.89@gmail.com

²Instituto de Investigación en Ciencias y Tecnología de la Universidad Cesar Vallejo, Trujillo, 13001, Peru. magui_12@hotmail.com, lcabanillas@ucv.edu.pe

³Escuela de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Cesar Vallejo, Trujillo, 13001, Peru. jordanquiroz756@gmail.com, mishelvigo@gmail.com, mishellzavaletap@gmail.com

⁴Laboratorio de Investigación Multidisciplinaria (LABINM), Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, 13008, Peru. langelatss@upao.edu.pe

Resumen- La contaminación ambiental y la falta de energía eléctrica han conllevado al uso de fotobiorreactores para producción de electricidad amigable con el medio ambiente. Se ha utilizado el diseño de un fotobiorreactor para la producción de electricidad utilizando como combustible a la microalga *Chlorella sp.*, el cual se fabricó utilizando electrodos de cobre y zinc. Se logró generar valores máximos de 0.93179 ± 0.0323 V y 23.79 ± 0.9516 mA en el día 25 y 22 respectivamente; así como una densidad de potencia y corriente máxima de 4.71441 ± 0.12861 W/cm² y 401.5873 mA/cm². Los valores de conductividad, pH y densidad aumentaron desde 25.499 ± 1.286 mS.cm⁻¹, 7 y $1.151 \times 10^6 \pm 0.041 \times 10^6$ cel/mL correspondientes al primer hasta 76.8 ± 1.0896 mS.cm⁻¹, 8.97 ± 0.1897 y $1.527 \times 10^7 \pm 0.024 \times 10^7$ cel/mL en el día 27, 15 y 25 respectivamente, en los cuales mostraron sus valores máximos. La espectrofotometría con Transformada de Fourier (FTIR) muestra las bandas características de la presencia de los enlaces de C=O, N-H, C-N, O-H y N-H presentes en las microalgas. Por otro lado, el MEB muestra la formación de una biopelícula porosa en los electrodos de zinc y cobre; este resultado demuestra que se ha logrado una nueva forma de producción de electricidad generando altos valores de voltaje y corriente, utilizando materiales de bajo costo.

Palabras claves-- celda de combustible microbiana, microalgas, *Chlorella sp.*, generación, voltaje, corriente.

Abstract- Environmental pollution and lack of electrical energy have led to the use of photobioreactors for the production of electricity that is friendly to the environment. The design of a photobioreactor has been used for the production of electricity using as fuel the microalgae *Chlorella sp.*, which was manufactured using copper and zinc electrodes. Maximum values of 0.93179 ± 0.0323 V and 23.79 ± 0.9516 mA were generated on days 25 and 22 respectively; as well as a maximum power and current density of 4.71441 ± 0.12861 W / cm² and 401.5873 mA / cm². The conductivity, pH and density values increased from 25.499 ± 1.286 mS.cm⁻¹, 7 and $1.151 \times 10^6 \pm 0.041 \times 10^6$ cells / mL corresponding to the first to 76.8 ± 1.0896 mS.cm⁻¹, 8.97 ± 0.1897 and $1.527 \times 10^7 \pm$

0.024×10^7 cells / mL on days 27, 15 and 25 respectively, in which they showed their maximum values. Fourier Transform spectrophotometry (FTIR) shows the characteristic bands of the presence of C = O, N - H, C - N, O - H and N - H bonds present in microalgae. On the other hand, the SEM shows the formation of a porous biofilm on the zinc and copper electrodes; This result shows that a new form of electricity production has been achieved by generating high voltage and current values, using low-cost materials.

Keywords - microbial fuel cell, microalgae, *Chlorella sp.*, generation, voltage, current.

I. INTRODUCCIÓN

La explosión demográfica combinada con un consumo rápido de reservas limitadas de petróleo (combustibles fósiles) está contribuyendo al calentamiento global mediante el aumento del CO₂ atmosférico [1]. El cambio climático es actualmente una de las mayores amenazas para la humanidad [2]. Por lo tanto, las demandas de energía están causando consecuencias ecológicas que han obligado a buscar otras opciones para sustituir los combustibles fósiles [3]. Algunas fuentes de energía alternativas sostenibles que están disponibles en la actualidad presentan desventajas como la dependencia del clima (energía eólica y solar) [4][5]. Existen investigaciones con respecto a la búsqueda de alternativas para combatir el cambio climático y sus efectos [6]. Sin embargo, en los últimos años ha tomado mayor interés el uso de algas, debido a su gran importancia ambiental ya que absorben el 40% del carbono presente en la tierra [7], además de ofrecer a la biósfera una considerable proporción de oxígeno [8]. Su importancia ecológica radica en su abundancia, su extrema biodiversidad y

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.127>

ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

la habilidad de sobrevivir en una variedad de ambientes, desde los muy extremos, como los suelos desérticos hasta ambientes moderados, como lagos de agua dulce y océanos [9].

Los biocombustibles que se pueden generar a partir de las algas verdes y las cianobacterias representan una excelente fuente de energía renovable [10]. Algunos de los biocombustibles que se pueden generar a partir de estas algas son el biodiesel, biogás y biohidrógeno [11-13]. Dentro de las algas, existe un grupo de mayor interés llamadas microalgas, las cuales se consideran la forma más primitiva y dominante de vida fotosintética en la superficie de la Tierra [13]. Desempeñan un papel importante en la dinámica del flujo de energía en un ecosistema y son una inmensa fuente de varios productos naturales con un alto valor ecológico y económico [14]. Las microalgas representan a un grupo diverso de microorganismos fotosintéticos con una estructura simple lo que permite el rápido crecimiento celular y por lo tanto una mayor producción de biomasa [15]. Por esta razón, las microalgas son llamados microorganismos foto autótrofos, siendo la luz su principal fuente de energía y el dióxido de carbono (CO_2) su principal fuente de carbono [16]. La composición de la biomasa es determinante para la clasificación de las especies de acuerdo a su función y sus productos, la cual está constituida por carbohidratos, proteínas y lípidos; además, estos microorganismos son capaces de producir antibióticos, pigmentos, esteroides y otros compuestos haciendo solo uso de la luz solar, el dióxido de carbono y el agua de mar. Por ello, la biotecnología de microalgas ha ganado relevancia y un progreso considerable en las últimas décadas [17-18].

Las CCMs son sistemas bioelectroquímicos que utilizan el metabolismo microbiano de la materia orgánica para transformarlo en bioelectricidad [19]. Consiste de una cámara anódica y catódica, casi siempre separado por una membrana de intercambio protónico. Los microorganismos presentes en la materia orgánica se oxidan en la cámara anódica generando electrones y protones, los electrones viajan a través de un circuito externo y los protones por medio de la membrana hacia el cátodo generando agua en presencia de oxígeno [20]. Los electrodos usados en las cámaras anódicas y catódicas son de crucial importancia debido a que son los encargados de oxidar y reducir a la materia orgánica [21], debido a esto las CCMs han sido fabricadas utilizando diferentes tipos de electrodos; entre ellos los metálicos, que se presentan como una buena opción debido a su bajo costo en el mercado y al mantenimiento [21]. You et al. [22] utilizó mallas de acero inoxidable como electrodos y sustrato de glucosa en su CCM, logrando obtener una densidad de potencia de 951.6 mW/m^2 y un voltaje de 0.51 V utilizando una resistencia externa de 400Ω . También se ha usado papel de aluminio y carbón activado como cátodo y

ánodo respectivamente, logrando generar 90 mW/m^3 el primer día para luego disminuir a valores cercanos a 58 mW/m^3 , identificando los *Bacillus cereus* como los microbios adheridos a la biopelícula anódica [23]. Zhang et al. [24] utilizó electrodos de espuma de níquel y grafeno como electrodos y como sustrato algas, logrando generar 36.4 mW/m^2 de densidad de potencia máxima, así como también la eliminación de cadmio (Cd) en aproximadamente un 95%; concluyendo que la precipitación del hidróxido y la biosorción son los causantes principales de la eliminación de Cd. Existen gran cantidad de investigaciones sobre la utilización de este tipo electrodos debido a la alta generación de electricidad, pero existe la posibilidad de que la corrosión libere elementos tóxicos para los microorganismos causantes de la generación de electricidad [25-27].

El territorio peruano posee abundantes alternativas para aprovechar los recursos proporcionados por la naturaleza y emprender un avance sustentable hacia su desarrollo, sin embargo; según el presidente del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, el 6% de la población peruana no cuenta con electricidad debido a su lejanía de las metrópolis, de lo cual es difícil de creer, porque el Perú es el quinto país latinoamericano más atractivo para invertir en energías renovables [28]. El gobierno peruano está doblemente comprometido con el aprovechamiento de energías renovables, pues se propuso utilizarlas como fundamento de su matriz energética para el año 2025 con el fin de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero [29]. Por otro lado, existen investigaciones relacionadas con la producción de energía eléctrica usando microalgas, por ejemplo, Gouveia et al. [30] demostró la producción de bioelectricidad y pigmentos de valor agregado en una celda de combustible microbiana de alga fotosintética (Proton-exchange membrane fuel cell – PEMFC) usando como combustible microalgas *Chlorella vulgaris* en el compartimento del cátodo y un consorcio bacteriano en el ánodo, logrando generar una potencia máxima de 62.7 mW/m^2 con una intensidad de luz de $96 \mu\text{E}/(\text{m}^2/\text{s})$; estos resultados mostraron que el aumento de la intensidad de la luz de 26 a $96 \mu\text{E}/(\text{m}^2/\text{s})$ conduce a un aumento de aproximadamente 6 veces en la potencia producida. Por otro lado, Cui et al. [31] desarrolló una celda de combustible microbiana (CCM) para tratar los desechos orgánicos, producir electricidad y producción de microalgas simultáneamente, utilizando como combustible biomasa de microalgas muertas (un vector de contaminación potencial en las corrientes) como sustrato en el ánodo y el CO_2 generado en este compartimiento se usó para cultivar microalgas de agua dulce en el cátodo. Además, se comparó el rendimiento de la CCM alimentada con acetato donde la densidad de potencia máxima fue de $1926 \pm 21.4 \text{ mW/m}^2$ ($8.67 \pm 0.10 \text{ W/m}^3$, a $R_{\text{ext}} = 100 \Omega$) y eficiencia coulombica (EC) de $6.3 \pm 0.2\%$.

El objetivo del presente estudio fue la generación de energía eléctrica utilizando un sistema combinado de los principios de la Celda de Combustible Microbiana y de un Fotobiorreactor tipo Airlift usando como sustrato la microalga

Chlorella sp. con la posibilidad de producir biomasa mediante el suministro de CO₂ del ambiente con la finalidad de reducir los gases contaminantes para del ambiente y la producción de energía. Se monitoreó la generación de voltaje, corriente, pH, conductividad, biomasa y densidad; así como los valores de densidad de corriente y potencia. También se muestra la micrografía de la biopelícula con los compuestos que la forman, y el espectro del FTIR de las microalgas *Chorella sp.*

II. MATERIAL Y MÉTODO

A. Diseño del Fotobiorreactor

Los fotobiorreactores estuvieron conformados por tanques de vidrio de 29 cm de alto y 9.15 cm de ancho, en su base se insertó una manguera con perforaciones circulares que permitían el ingreso de aire en forma de burbujas, la cual estaba conectada a una bomba de 1/16 HP. También se utilizó una tapa de jebe microporoso con dos perforaciones por donde salían los cables de cobre sobrantes de los electrodos de zinc (cátodo) y cobre (ánodo) cuyas áreas eran de 105 ± 2.3 cm²; en la Fig. 1 (a) se puede apreciar el esquema del prototipo. El fotobiorreactor se colocó sobre un soporte de madera acondicionado con dos focos led de 8 watts (ver figura 1 (b)) con el fin de simular la radiación del sol, este se mantuvo encendido todos los días de la investigación. Todos los materiales fueron esterilizados inicialmente mediante la exposición a la luz ultravioleta durante 2 horas.

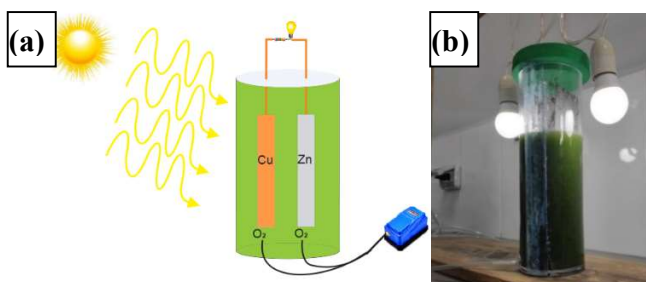


Fig. 1:(a) esquematización del fotobiorreactor y (b) prototipo del fotobiorreactor para el cultivo de la microalga *Chorella sp.*

B. Medio de Cultivo

Se preparó un medio a base de urea (0.15 g) y cloruro de potasio (0.015 g) en 100 ml de caldo de residuos de pescado previamente filtrado y esterilizado en autoclave a 121 °C durante 15 min.

C. Preparación del inóculo de *Chorella sp*

De un cultivo de microalgas *Chorella sp* unicelular de color verde se agregó agua destilada en proporción 1:1 y se centrifugó a 3500 rpm por 15 min para obtener la biomasa. Este proceso se realizó por tres veces para obtener una muestra pura. Se obtuvo un volumen de 300 ml de inóculo de microalga *Chorella sp* que fue añadido a 1.7 L de medio de caldo de

residuos de pescado a un pH de 7.0 y temperatura ambiente (22 ± 2.1 °C).

D. Caracterización del fotobiorreactor

El monitoreo del voltaje y corriente (con resistencia externa de 10 ± 0.2 Ω) se realizó mediante un multímetro (Prasek Premium PR-85) cada 24 horas por un periodo de 30 días. Mientras que para la medición de densidad de corriente (DC) y densidad de potencia (DP) se usaron las resistencias externas de 10 ± 0.2, 20 ± 1.0, 40 ± 2.3, 50 ± 2.7, 100 ± 3.2, 200 ± 5.1, 300 ± 6.2, 390 ± 7.2, 560 ± 10, 680 ± 12.3, 820 ± 14.5, 1000 ± 20.5 Ω; mediante la fórmula DC=I/A y DP=IV/A [32], donde I es la corriente con diferentes resistencias externas, V es el voltaje del fotobiorreactor a circuito abierto y A el área (105 ± 2.3 cm²). El monitoreo de los cambios de la conductividad (conductivity meter CD-4301) y el pH (pH- meter 110 Series Oakton) también fueron medidas.

El conteo celular se realizó por método directo con la cámara de Neubauer [33], los cuales se realizaron cada 24 horas y la identificación se hizo mediante la observación en el Microscopio Binocular LED (Olympus Modelo CX23LFS1). Este proceso se realizó por 30 días. Para la determinación de la concentración se utilizó la ecuación de Bastidas O. [33], con la cual se obtiene la concentración de células por mililitro (ver ecuación 1)

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Total células contadas} \times 10.000}{\text{Número de cuadrados} \times \text{dilución}} \quad (1)$$

Mientras que las identificaciones de los compuestos presentes en el ánodo y cátodo se realizaron por medio de la espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS) y las micrografías de un microscopio electrónico de barrido (MEB) TECSAN VEGA 3 LM equipado con un sistema de revestimiento de oro SPI 11430-AB (TESCAN USA, EE UU). Las muestras solidas de las microalgas *Chorellasp* fueron analizadas por el Espectrofotómetro con Transformada de Fourier-FTIR (IS50-Thermo Scientific).

III. RESULTADOS Y ANALISIS

En la Fig. 2 (a) se muestra el monitoreo del voltaje del fotorreactor, se observa que los valores promedios de voltaje permanecen constantes durante el día 13 al 23 con valores cercanos a 0.9 ± 0.033 V, luego del día 24 se observa que lo valores de voltaje comienzan a descender hasta 0.81 ± 0.031 V en el día 30. Mientras que en la Fig. 2 (b) se muestran los valores de corriente durante los 30 días de monitoreo, se observa que en los primeros dos días los valores promedios de corriente no superan los 10 mA pero a partir del tercer día los

valores se incrementan de manera abrupta hasta el quinto día; en los días sucesivos los valores fluctúan entre 17.5 ± 0.692 a 24 ± 0.864 mA hasta el día 25 donde decae hasta 15 ± 0.602 mA en el último día de monitoreo.

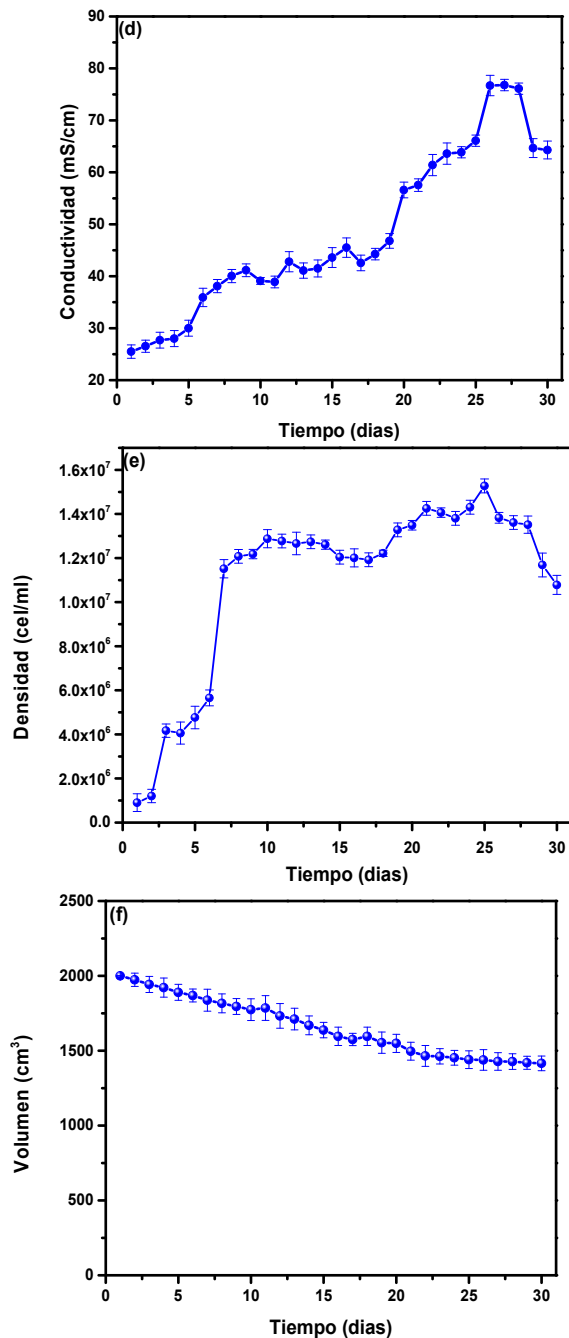
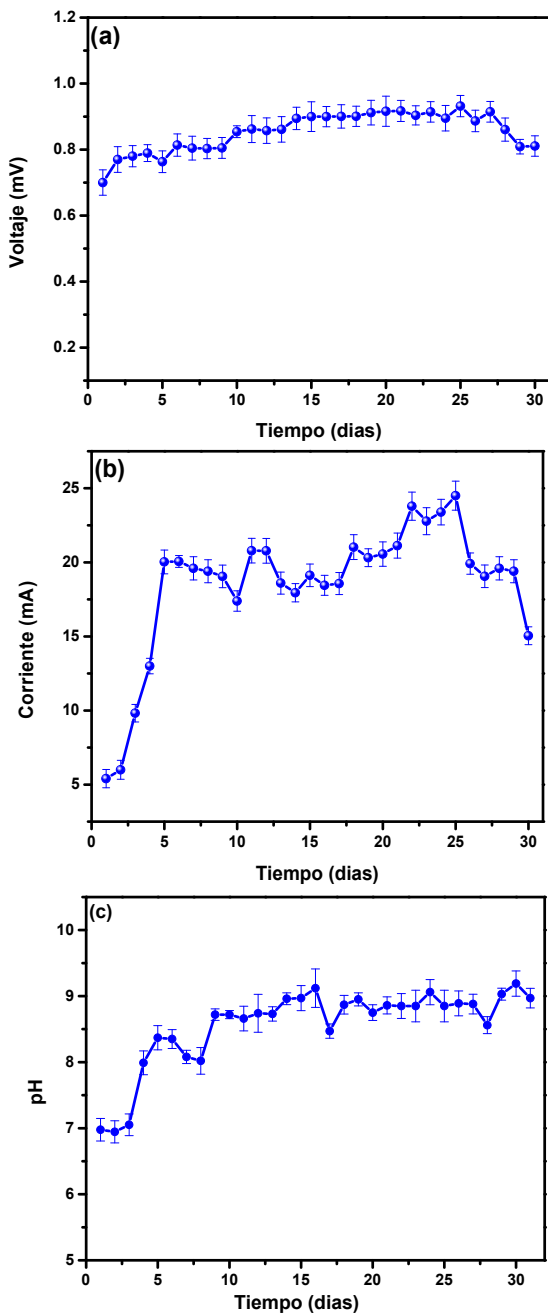


Fig. 2: Monitoreo de la generación de (a) voltaje, (b) corriente, (c) pH, (d) conductividad, (e) crecimiento de la densidad y (f) volumen del fotobiorreactor durante 30 días.

Los altos valores mostrados se deben al alto contenido de compuestos orgánicos e inorgánicos como sustrato [34], así como también al enriquecimiento con microbio electroactivo en el ánodo y a las transferencias de electrones o a la

autorregulación de las vías extracelulares de transferencia de electrones [35-37].

El descenso de los valores de voltaje y corriente en los últimos días se debería a la difusión de oxígeno del cátodo al ánodo debido a la falta de una membrana entre ellos [38]. En la Fig. 2 (d) se muestra la variación de pH del fotobiorreactor durante 30 días, se observa que los valores aumentaron abruptamente a partir del cuarto día (8 ± 0.1799) hasta llegar a un pico de 8.97 ± 0.1897 en el día 15; después se mantuvo aproximadamente constante mostrando un pH ligeramente alcalino. El aumento del pH se debe a la transferencia de protones del ánodo al cátodo y al aumento de las reacciones catódicas [39], aunque un pH neutro es el óptimo para la generación de electricidad en las CCMs [40]; debido a esto se debe considerar en investigaciones futuras algún mecanismo para la autoregularización del fotobiorreactor a pH neutro. El descenso de los valores de voltaje y corriente en los últimos días se debería a la difusión de oxígeno del cátodo al ánodo debido a la falta de una membrana entre ellos [38]. En la Fig. 2 (d) se muestra la variación de pH del fotobiorreactor durante 30 días, se observa que los valores aumentaron abruptamente a partir del cuarto día (8 ± 0.1799) hasta llegar a un pico de 8.97 ± 0.1897 en el día 15; después se mantuvo aproximadamente constante mostrando un pH ligeramente alcalino. El aumento del pH se debe a la transferencia de protones del ánodo al cátodo y al aumento de las reacciones catódicas [39], aunque un pH neutro es el óptimo para la generación de electricidad en las CCMs [40]; debido a esto se debe considerar en investigaciones futuras algún mecanismo para la autoregularización del fotobiorreactor a pH neutro.

En la Fig. 2 (d) se muestra la conductividad promedio del fotobiorreactor, como se puede observar la conductividad aumenta desde el primer día ($25.499 \pm 1.286 \text{ mS.cm}^{-1}$) hasta llegar a su pico en el día 27 ($76.8 \pm 1.0896 \text{ mS.cm}^{-1}$), después se comienza a notar un descenso de los valores hasta el día 30 ($64.3 \pm 1.716 \text{ mS.cm}^{-1}$). Según Nam et al. (2010) los aumentos de los valores de conductividad ayudan a la mayor generación de electricidad debido a la relación entre conductividad y resistencia en las cámaras anódicas; a mayor conductividad menor resistencia iónica de la solución [41]. Lo que nos lleva a deducir que en los 27 días se han producidos sales inorgánicas, manteniendo la conductividad iónica para lograr el equilibrio de neutralidad del sistema, debido a que una baja conductividad iónica limita la transferencia de cationes del ánodo al cátodo y retrasa el equilibrio de electro-neutralidad del fotobiorreactor [42][43]. En la Fig. 2 (e) se muestra el crecimiento de las

densidades promedio (cel/mL) de los fotoreactores durante 30 días, como se puede observar, en el séptimo día hubo crecimiento abrupto de la biomasa de la microalga *Chlorella sp* obteniéndose $1.151 \times 10^6 \pm 0.041 \times 10^6 \text{ cel/mL}$, de acuerdo con la curva de crecimiento se puede afirmar que la *Chlorella sp* aún se encuentra en la fase exponencial de su desarrollo, siendo el día 25 el pico de crecimiento ($1.527 \times 10^7 \pm 0.024 \times 10^7 \text{ cel/mL}$).

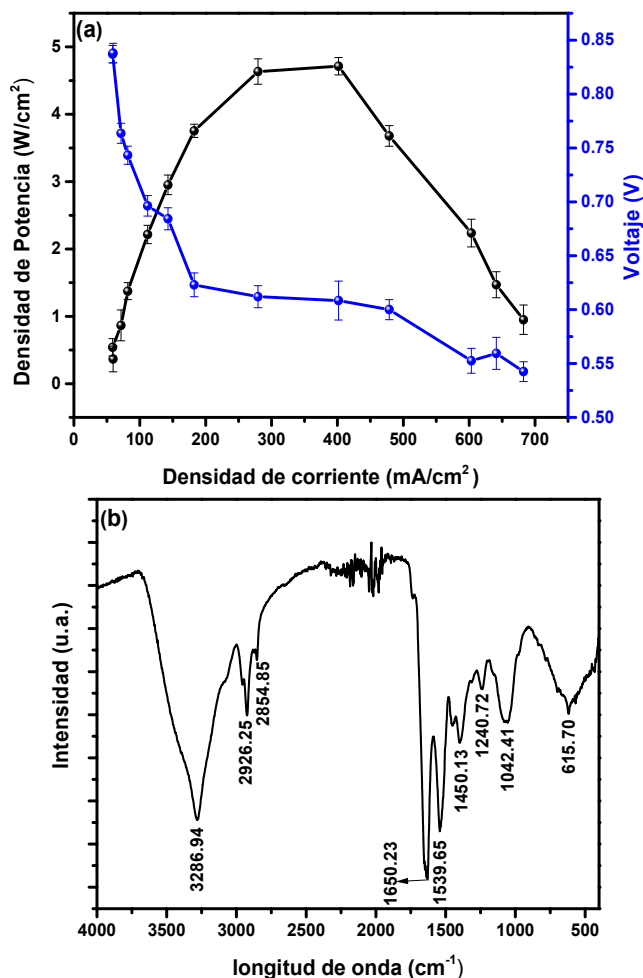


Fig. 3: (a) Densidad de potencia y voltaje en relación con la densidad de corriente y (b) espectro de FTIR de la microalga *Chlorella sp* de los fotoreactores.

En los cultivos en lote, la población de microalgas se incrementa hasta que existe algún factor limitante, cualquier subproducto de las células durante su crecimiento estará presente en el medio de cultivo. Una vez que los recursos se hayan agotado, el cultivo muere [44]. Foladori et al. (2018) encontraron que algunos de los efectos que provoca la turbulencia (producto de la aireación) son la remoción del oxígeno, la disolución y distribución del CO₂, así como los

nutrientes son indispensable en cultivos densos [45]. En cualquier tipo de reactor, la tasa de aireación determina la fluctuación de la exposición a luz, pero también la mezcla y la turbulencia del fluido. Sin embargo, altas tasas de aireación ocasionan esfuerzos cortantes que pueden dañar las microalgas, por esta razón, es necesario evaluar su efecto para cada especie de microalga [46].

Los organismos fotosintéticos como las plantas, algas y cianobacterias realizan procesos metabólicos donde se producen reacciones fotovoltaicas a nanoescala, que mediante la fotosíntesis usan la radiación para oxidar el agua (fotólisis) produciendo electrones resultantes empleados para sintetizar trifosfato de adenosina (ATP) y fosfato de dinucleótido de adenina β -nicotinamida (NADPH) [47]. A pesar de que las celdas fotobioelectroquímicas microbianas convierten la luz en electricidad explotando la actividad fotosintética de los microorganismos fototróficos, existe la posibilidad de extraer electrones directamente del proceso de fotosíntesis de un microorganismo fotoautótrofo [48][49]. En la Fig. 2 (e) se muestra la disminución del volumen promedio de los fotorreactores, como se puede observar la curva siempre se mostró descendiente desde 2000 ± 0.98 hasta 1155 ± 49.1155 mL, lo que puede deber a las condiciones ambientales.

En la Fig. 3 (a) se muestra la curva de densidad de potencia y curva de polarización de los fotorreactores, la DP de máxima generada fue de 4.71441 ± 0.12861 W/cm² en una DC de 401.5873 mA/cm², así como un voltaje máximo de 0.838 ± 0.00904 V. Aunque el trabajo realizado por Ndayisenga et al. (2018) nos dice que las biomásas de las microalgas contienen macromoléculas que demandan de más energía para su degradación, en comparación con los compuestos solubles simples, el metabolismo y degradación de la microalga *Chlorella sp* aumentan su concentración de sustrato lo que conllevaría a la mayor generación de electricidad [50][51]. La Fig. 3 (b) muestra el espectro típico de FTIR de la biomasa seca de las microalgas *Chlorella sp.*, donde las macromoléculas de interés encontradas fueron los carbohidratos, lípidos y proteínas. Las bandas características fueron 1650.23 cm⁻¹ y 1539.65 cm⁻¹ pertenecientes a la amida I y II respectivamente; ambas bandas se debieron a las vibraciones de estiramiento del C=O, así como a las vibraciones de flexión del N-H y C-N en los enlaces de la amida. Mientras que las bandas entre 1250 y 1000 cm⁻¹ se deben a los carbohidratos y grupos funcionales de macromoléculas [52][53]. La banda 3286.94 cm⁻¹ es característica de los grupos O-H y N-H unidos y libres, que

pueden enlazarse para formar hidrogeno con los grupos carbonilo del enlace peptídico en la proteína [51].

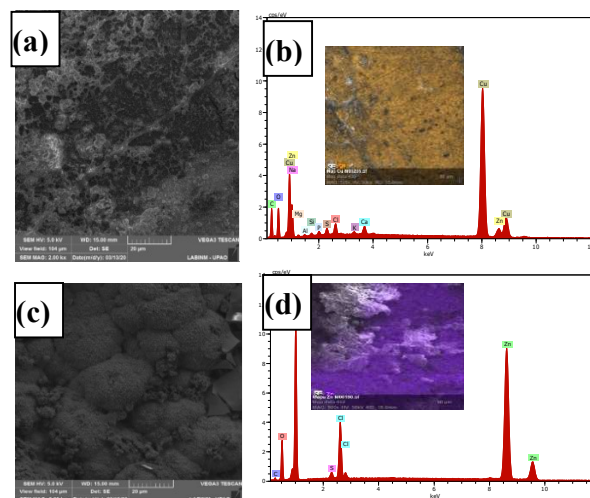


Fig. 4: Micrografías y EDS de los electrodos de Cu y Zn.

En la Fig. 4 (a) y (b) se muestra la micrografía y EDS respectivamente del electrodo de cobre, en la micrografía se observa claramente la adhesión de la biopelícula porosa generada debido a la actividad microbiana de las algas en la producción de electricidad, mientras que en el EDS se observa la presencia de Zn, Na, O, C entre otros; la alta presencia de Cu es debido al material usado como electrodo. Por otro lado, en la Fig. 4 (c) y (d) se muestra la micrografía y EDS respectivamente del electrodo de Zinc, en la micrografía se observa una adhesión de material más compacta que en el de Cu, este material compacto está compuesto de Cl, C, S y O según los resultados del EDS.

CONCLUSION

Se logró generar exitosamente electricidad mediante el fotorreactor utilizando como combustible microalgas *Chlorella sp*, logrando obtener un voltaje y corriente máximo de 0.93179 ± 0.0323 V y 23.79 ± 0.9516 mA en el día 25 y 22 respectivamente. La DP_{max} y DC_{max} mostrada por el sistema fue de 4.71441 ± 0.12861 y 401.5873 mA/cm², respectivamente. Así también se observó el aumento del pH desde un valor neutro (7) hasta valores ligeramente alcalinos (8.97 ± 0.1897), lo que coincidirá con el aumento de la densidad que obtuvo un pico de crecimiento de $1.527 \times 10^7 \pm 0.024 \times 10^7$ cel/mL en el día 25. El FTIR muestra la presencia de carbohidratos, lípidos y proteínas debido a los picos observados de las bandas de C=O, N-H, C-N, O-H y N-H procedentes de las algas; mientras que la micrografía muestra la presencia de una biopelícula porosa tanto en el electrodo de zinc y cobre, mientras que el EDS muestra una mayor presencia de Zn y Na en el electrodo de Cu,

así como también Cl y O en el electrodo Zinc. Esta investigación da una novedosa forma de producción de electricidad y O₂, logrando obtener valores de energía muy altos a los generados por otros trabajos utilizando como electrodos materiales de bajo costo como son los electrodos de zinc y cobre.

REFERENCIAS

- [1] Bong, C. P. C., Lim, L. Y., Ho, W. S., Lim, J. S., Klemeš, J. J., Towprayoon, S., ... & Lee, C. T. (2017). A review on the global warming potential of cleaner composting and mitigation strategies. *Journal of Cleaner Production*, 146, 149-157.
- [2] Baer, H., & Singer, M. (2016). *Global warming and the political ecology of health: Emerging crises and systemic solutions*. Routledge.
- [3] Satyanarayana K. G., Mariano A. B. and Vargas J. V. C., 2011. A review on microalgae, a versatile source for sustainable energy and materials, *Int. J. Energy Res.* 35, 291-311.
- [4] Huesemann MH. 2006. Can advances in science and technology prevent global warming? A critical review of limitations and challenges, *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Chang.*, 11, 539-577.
- [5] Fargione J, Hill J, Tilman D, Polasky S, Hawthorne P. 2008. Land clearing and the biofuel carbon debt, *Science*, 319, 1235-1238.
- [6] Anderson, T. R., Hawkins, E., & Jones, P. D. (2016). CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. *Endeavour*, 40(3), 178-187.
- [7] Robinson, S., Roach, T., Reyes, N., Puckett, K., & Bounds, S. (2016). The Effects of Light on Oxygen Production in Algae Water. *Journal of Introductory Biology Investigations*, 5(3).
- [8] Show, K. Y., Yan, Y. G., & Lee, D. J. (2019). Biohydrogen production from algae: Perspectives, challenges, and prospects. In *Biofuels from Algae* (pp. 325-343). Elsevier.
- [9] Norton, T. A., Melkonian, M., & Andersen, R. A. (1996). Algal biodiversity. *Phycologia*, 35(4), 308-326.
- [10] Nalley, J. O., O'Donnell, D. R., & Litchman, E. (2018). Temperature effects on growth rates and fatty acid content in freshwater algae and cyanobacteria. *Algal Research*, 35, 500-507.
- [11] Maneeruttanarungroj, C., Lindblad, P., Incharoensakdi, A., 2012. Sulfate permease (SulP) and hydrogenase (HydA) in the green alga *Tetraspora* sp. CU2551: Dependence of gene expression on sulfur status in the medium. *Int. J. Hydrogen Energy* 37, 15105-15116.
- [12] Khetkorn, W., Khanna, N., Incharoensakdi, A., Lindblad, P., 2013. Metabolic and genetic engineering of cyanobacteria for enhanced hydrogen production. *Biofuels* 4, 535-561.
- [13] Skjånes, K., Rebours, C., Lindblad, P., 2013. Potential for green microalgae to produce hydrogen, pharmaceuticals and other high value products in a combined process. *Crit. Rev. Biotechnol.* 33, 172-215.
- [14] Rastogi, R.P., Madamwar, D., Pandey, A., 2017. *Algal Green Chemistry-Recent progress in Biotechnology*, first ed. Elsevier, Amsterdam.
- [15] Li Y and Huang J. 2009. High-light and sodium chloride stress differentially regulate the biosynthesis of astaxanthin in *Chlorella zofingiensis*. *Journal of Phycology* 45: 635-641.
- [16] Baroni, E., Cao, B., Webley, P. A., Scales, P. J., & Martin, G. J. O. (2020). Nitrogen availability and the nature of extracellular organic matter of microalgae. *Industrial & Engineering Chemistry Research*.
- [17] Shuba, E. S., & Kifle, D. (2018). Microalgae to biofuels: 'Promising' alternative and renewable energy, review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 743-755.
- [18] Odjadjare, E. C., Mutanda, T., & Olaniran, A. O. (2017). Potential biotechnological application of microalgae: a critical review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 37(1), 37-52.
- [19] Palanisamy, G., Jung, H. Y., Sadhasivam, T., Kurkuri, M. D., Kim, S. C., & Roh, S. H. (2019). A comprehensive review on microbial fuel cell technologies: Processes, utilization, and advanced developments in electrodes and membranes. *Journal of Cleaner Production*.
- [20] Do, M. H., Ngo, H. H., Guo, W., Chang, S. W., Nguyen, D. D., Liu, Y., ... & Kumar, M. (2019). Microbial fuel cell-based biosensor for online monitoring wastewater quality: A critical review. *Science of The Total Environment*, 135612.
- [21] Mian, M. M., Liu, G., & Fu, B. (2019). Conversion of sewage sludge into environmental catalyst and microbial fuel cell electrode material: A review. *Science of The Total Environment*.
- [22] You, S. J., Wang, X. H., Zhang, J. N., Wang, J. Y., Ren, N. Q., & Gong, X. B. (2011). Fabrication of stainless steel mesh gas diffusion electrode for power generation in microbial fuel cell. *Biosensors and Bioelectronics*, 26(5), 2142-2146.
- [23] Jeong, C. M., Choi, J. D. R., Ahn, Y., & Chang, H. N. (2008). Removal of volatile fatty acids (VFA) by microbial fuel cell with aluminum electrode and microbial community identification with 16S rRNA sequence. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 25(3), 535-541.
- [24] Zhang, Y., He, Q., Xia, L., Li, Y., & Song, S. (2018). Algae cathode microbial fuel cells for cadmium removal with simultaneous electricity production using nickel foam/graphene electrode. *Biochemical Engineering Journal*, 138, 179-187.
- [25] Bakar, M. H. A., Daud, W. R. W., Hong, K. B., & Jahim, J. M. (2019). Can electrochemically active biofilm protect stainless steel used as electrodes in bioelectrochemical systems in a similar way as galvanic corrosion protection?. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(58), 30512-30523.
- [26] Iannucci, L., Parvis, M., Cristiani, P., Ferrero, R., Angelini, E., & Grassini, S. (2019). A Novel Approach for Microbial Corrosion Assessment. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(5), 1424-1431.
- [27] Chen, W., Liu, Z., Li, Y., Jiang, K., Hou, J., Lou, X., ... & Zhu, X. (2019). A novel stainless steel fiber felt/Pd nanocatalyst electrode for efficient ORR in air-cathode microbial fuel cells. *Electrochimica Acta*, 324, 134862.
- [28] Verde, V., & Elena, L. (2019). Cultura organizacional y gestión de calidad en el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, 2019.
- [29] Escobar, R., Gamio, P., Moreno, A. I., Castro, A., Cordero, V., & Vásquez, U. (2016). Energización rural mediante el uso de energías renovables para fomentar un desarrollo integral y sostenible: Propuestas para alcanzar el acceso universal a la energía en el Perú.
- [30] Gouveia, L., Neves, C., Sebastião, D., Nobre, B. P., & Matos, C. T. (2014). Effect of light on the production of bioelectricity and added-value microalgae biomass in a photosynthetic alga microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 154, 171-177.
- [31] Cui, Y., Rashid, N., Hu, N., Rehman, M. S. U., & Han, J. I. (2014). Electricity generation and microalgae cultivation in microbial fuel cell using microalgae-enriched anode and bio-cathode. *Energy conversion and management*, 79, 674-680.
- [32] Zhuang, L., Zheng, Y., Zhou, S., Yuan, Y., Yuan, H., & Chen, Y. (2012). Scalable microbial fuel cell (MFC) stack for continuous real wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 106, 82-88.
- [33] Bastidas, O. (2011). Conteo celular con Hematocitómetro. *Technical Note- Neubauer Chamber Cell Counting*, 1-6.
- [34] Nayak, J. K., & Ghosh, U. K. (2020). Microalgal remediation of anaerobic pretreated pharmaceutical wastewater for sustainable biodiesel production and electricity generation. *Journal of Water Process Engineering*, 35, 101192.

- [35] Jiang, H. M., Luo, S. J., Shi, X. S., Dai, M., & Guo, R. B. (2013). A system combining microbial fuel cell with photobioreactor for continuous domestic wastewater treatment and bioelectricity generation. *Journal of Central South University*, 20(2), 488-494.
- [36] Grobber, C., Virdis, B., Nouwens, A., Harnisch, F., Rabaey, K., & Bond, P. L. (2018). Effect of the anode potential on the physiology and proteome of *Shewanella oneidensis* MR-1. *Bioelectrochemistry*, 119, 172-179.
- [37] Sun, J., Yang, P., Li, N., Zhao, M., Zhang, X., Zhang, Y., ... & Lu, X. (2020). Extraction of photosynthetic electron from mixed photosynthetic consortium of bacteria and algae towards sustainable bioelectrical energy harvesting. *Electrochimica Acta*, 336, 135710.
- [38] Kakarla, R., & Min, B. (2019). Sustainable electricity generation and ammonium removal by microbial fuel cell with a microalgae assisted cathode at various environmental conditions. *Bioresource Technology*, 284, 161-167.
- [39] Tremouli, A., Martinos, M., & Lyberatos, G. (2017). The effects of salinity, pH and temperature on the performance of a microbial fuel cell. *Waste and Biomass Valorization*, 8(6), 2037-2043.
- [40] Moharir, P. V., & Tembhurkar, A. R. (2018). Effect of recirculation on bioelectricity generation using microbial fuel cell with food waste leachate as substrate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(21), 10061-10069.
- [41] Nam, J. Y., Kim, H. W., Lim, K. H., Shin, H. S., & Logan, B. E. (2010). Variation of power generation at different buffer types and conductivities in single chamber microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*, 25(5), 1155-1159.
- [42] Karthikeyan, R., Selvam, A., Cheng, K. Y., & Wong, J. W. C. (2016). Influence of ionic conductivity in bioelectricity production from saline domestic sewage sludge in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 200, 845-852.
- [43] Stefanova, A., Angelov, A., Bratkova, S., Genova, P., & Nikolova, K. (2018). INFLUENCE OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND TEMPERATURE IN A MICROBIAL FUEL CELL FOR TREATMENT OF MINING WASTE WATER. *Annals of the Constantin Brancusi University of Targu Jiu - Letters & Social Sciences Series*, (3).
- [44] Evangelista, V., Frassanito, A. M., Passarelli, V., Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2006). Microspectroscopy of the photosynthetic compartment of algae. *Photochemistry and photobiology*, 82(4), 1039-1046.
- [45] Foladori, P., Petrini, S., & Andreottola, G. (2018). Evolution of real municipal wastewater treatment in photobioreactors and microalgae-bacteria consortia using real-time parameters. *Chemical Engineering Journal*, 345, 507-516.
- [46] Ación, F. G., Molina, E., Reis, A., Torzillo, G., Zittelli, G. C., Sepúlveda, C., & Masojídek, J. (2017). Photobioreactors for the production of microalgae. In *Microalgae-based biofuels and bioproducts* (pp. 1-44). Woodhead Publishing.
- [47] Razzak, S. A., Ali, S. A. M., Hossain, M. M., & de Lasa, H. (2017). Biological CO₂ fixation with production of microalgae in wastewater—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 379-390.
- [48] Pruvost, J., Le Gouic, B., Lepine, O., Legrand, J., & Le Borgne, F. (2016). Microalgae culture in building-integrated photobioreactors: Biomass production modelling and energetic analysis. *Chemical Engineering Journal*, 284, 850-861.
- [49] Luo, Y., Le-Clech, P., & Henderson, R. K. (2017). Simultaneous microalgae cultivation and wastewater treatment in submerged membrane photobioreactors: a review. *Algal Research*, 24, 425-437.
- [50] Ndayisenga, F., Yu, Z., Yu, Y., Lay, C. H., & Zhou, D. (2018). Bioelectricity generation using microalgal biomass as electron donor in a bio-anode microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 270, 286-293.
- [51] Kumar, S. S., Basu, S., Gupta, S., Sharma, J., & Bishnoi, N. R. (2019). Bioelectricity generation using sulphate-reducing bacteria as anodic and microalgae as cathodic biocatalysts. *Biofuels*, 10(1), 81-86.
- [52] Shekh, A. Y., Shrivastava, P., Krishnamurthi, K., Mudliar, S. N., Devi, S. S., Kanade, G. S., & Chakrabarti, T. (2016). Stress enhances polyunsaturation rich lipid accumulation in *Chlorella sp.* and *Chlamydomonas*. *Biomass and Bioenergy*, 84, 59-66.
- [53] de Souza, M. P., Hoeltz, M., Muller, M. V. G., Gressler, P. D., Bjerck, T. R., de Souza Schneider, R. D. C., & Corbellini, V. A. (2019). Screening of fungal strains with potentiality to hydrolyze microalgal biomass by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). *Acta Scientiarum. Technology*, 41, e39693-e39693.